Artículo original
Rev Urug Cardiol 2026; 41:e206
doi: 10.29277/cardio.41.1.13

Valores de referencia de respuesta presora durante ecocardiograma de estrés con ejercicio físico en una población uruguaya según sexo, edad y carga de ejercicio

Ignacio Farro[1], Fabián Martínez[1], Carlos Américo[1], Matías Blanco[1], Bruno Tonelli[1], Pablo Fontes[1], Nohelia Rosado[1], Gabriel Parma[1], Natalia Lluberas[1], Julia Aramburu[1]

Resumen

Introducción: El ecocardiograma de estrés con ejercicio (EEE) es una herramienta cada vez más solicitada para el diagnóstico de cardiopatía isquémica y no isquémica a nivel mundial. Su realización requiere considerar las condiciones hemodinámicas y de carga ventricular en reposo y esfuerzo, que varían según el tipo e intensidad del ejercicio. Una respuesta presora hipertensiva durante el EEE constituye un predictor independiente de hipertensión y enfermedad cardiovascular (ECV). Sin embargo, en Uruguay y la región no existen valores de referencia.

Objetivos: Este trabajo tiene como objetivo analizar los cambios de presión arterial durante un EEE en población sin ECV y construir tablas de referencia de la respuesta presora por sexo y edad.

Metodología: Realizamos un estudio retrospectivo de una cohorte de 7248 pacientes entre 18 y 85 años (42% mujeres) sometidos a EEE, de los cuales 1582 cumplieron con los criterios de inclusión tras excluir sujetos con factores de riesgo y ECV conocida y se construyeron tablas con valores de referencia nacionales según sexo, edad y carga de esfuerzo.

Resultados: Los hombres presentaron mayores valores de PA máxima (193 ± 26 vs. 172 ± 24 mmHg), de carga y de tiempo máximo de ejercicio. En cambio, las mujeres mostraron incrementos de PA por carga significativamente superiores (1,0 ± 0,5 vs. 0,7 ± 0,4 mmHg/W), efecto que se acentuó con la edad. La edad, la presión arterial sistólica basal, la carga alcanzada y el tiempo de ejercicio fueron las variables que mostraron mayor capacidad para explicar la variación de la respuesta de presión arterial en relación con la carga.

Conclusiones: Este trabajo aporta por primera vez valores de referencia nacionales y regionales de respuesta presora durante un EEE, lo que permite mejorar la interpretación clínica e impulsa el desarrollo de futuras investigaciones.

Palabras clave VALORES DE REFERENCIA
RESPUESTA PRESORA
ECOCARDIOGRAMA DE ESTRÉS CON EJERCICIO
COMPORTAMIENTO HEMODINÁMICO

Reference values of pressure response during stress echocardiography with physical exercise in a Uruguayan population according to sex, age and exercise load

Abstract

Introduction: Exercise stress echocardiography (ESE) is an increasingly requested tool for the diagnosis of ischemic and non-ischemic heart disease worldwide. Its performance requires consideration of hemodynamic conditions

1. Cardiocentro, Asociación Española.
Autor responsable: Dr. Ignacio Farro Ventura. Correo electrónico: ignacio.farro@gmail.com
Los autores declaran no contar con fuentes de financiamiento para el estudio ni tener conflictos de intereses.
Todos los autores aprobaron la versión final del manuscrito y se hacen responsables de su contenido.
Recibido: Set 1, 2025; aceptado: Mar 3, 2026.

and ventricular load at rest and during exercise, which vary according to the type and intensity of the exercise. A hypertensive pressor response during ESE is an independent predictor of hypertension and cardiovascular disease (CVD). However, there are no reference values in Uruguay and the region.

Objectives: The aim of this study is to analyze blood pressure changes during an ESE in a population without CVD and to construct reference tables for the pressor response by sex and age.

Methods: We conducted a retrospective cohort study of 7248 patients aged 18–85 years (42% women) who underwent exercise stress echocardiography (ESE). After excluding subjects with cardiovascular risk factors or known cardiovascular disease, 1,582 patients met the inclusion criteria. National reference tables were developed according to sex, age, and exercise workload.

Results: Men had higher maximum BP values (193 ± 26 vs. 172 ± 24 mmHg), load, and maximum exercise time. In contrast, women showed significantly higher increases in BP per workload (1.0 ± 0.5 vs. 0.7 ± 0.4 mmHg/W), an effect that increased with age. Age, baseline systolic blood pressure, workload achieved, and exercise time were the variables that showed the greatest ability to explain the variability in the blood pressure response relative to workload.

Conclusions: This study provides, for the first time, national and regional reference values for pressor response during an ESE allowing for improved clinical interpretation and promoting the development of future research.

Key words: REFERENCE VALUES
BLOOD PRESSURE RESPONSE
EXERCISE STRESS ECHOCARDIOGRAM
HEMODYNAMIC BEHAVIOR

Valores de referência da resposta de pressão durante a ecocardiografia de estresse com exercício em uma população uruguaia de acordo com sexo, idade e carga de exercício

Resumo

Introdução: O ecocardiograma de esforço com exercício (EEE) é uma ferramenta cada vez mais solicitada para o diagnóstico de cardiopatia isquêmica e não isquêmica em todo o mundo. Sua realização requer a consideração das condições hemodinâmicas e da carga ventricular em repouso e esforço, que variam de acordo com o tipo e a intensidade do exercício. Uma resposta pressora hipertensiva durante o EEE constitui um preditor independente de hipertensão e doença cardiovascular (DCV). No entanto, no Uruguai e na região não existem valores de referência.

Objetivos: Este trabalho tem como objetivo analisar as alterações da pressão arterial durante um EEE em população sem DCV e construir tabelas de referência da resposta pressora por sexo e idade.

Métodos: Realizamos um estudo retrospectivo de uma coorte de 7.248 pacientes com idade entre 18 e 85 anos (42% mulheres) submetidos a ecocardiograma de estresse com exercício (EEE). Após a exclusão de indivíduos com fatores de risco cardiovascular ou doença cardiovascular conhecida, 1.582 pacientes preencheram os critérios de inclusão. Foram elaboradas tabelas de valores de referência nacionais de acordo com o sexo, a idade e a carga de esforço.

Resultados: Os homens apresentaram valores mais elevados de PA máxima (193 ± 26 vs. 172 ± 24 mmHg), carga e tempo máximo de exercício. Por outro lado, as mulheres apresentaram aumentos significativamente superiores da PA por carga (1,0 ± 0,5 vs. 0,7 ± 0,4 mmHg/W), efeito que se acentuou com a idade. A idade, a pressão arterial sistólica basal, a carga de trabalho atingida e o tempo de exercício foram as variáveis que apresentaram maior capacidade de explicar a variabilidade da resposta da pressão arterial em relação à carga.

Conclusões: Este trabalho fornece, pela primeira vez, valores de referência nacionais e regionais de resposta pressórica durante um EEE, permitindo melhorar a interpretação clínica e impulsionar o desenvolvimento de futuras pesquisas.

Palavras-chave VALORES DE REFERÊNCIA
RESPOSTA PRESSÓRICA
ECOCARDIOGRAMA DE ESFORÇO
COM EXERCÍCIO
COMPORTAMENTO HEMODINÂMICO

Abreviaturas

ECV: Enfermedad cardiovascular
EEE: Ecocardiograma de estrés con Ejercicio
FC: Frecuencia cardíaca
FCM: Frecuencia cardíaca máxima
FEVI: Fracción de eyección del ventrículo izquierdo
GC: Gasto cardíaco
HTA: Hipertensión arterial
IVT: Integral velocidad-tiempo
MVO2: Consumo miocárdico de oxígeno
PA, PAS, PAD: Presión arterial, presión arterial sistólica, presión arterial diastólica
PADer: Presión auricular derecha
PAM: Presión arterial media
RPH: Respuesta presora hipertensiva
RVS: Resistencia vascular sistémica
RLM: Regresión lineal múltiple
TSVI: Tracto de salida del ventrículo izquierdo
VFD: Volumen de fin de diástole
VFS: Volumen de fin de sístole

Principales aportes

Este trabajo aporta, por primera vez en Uruguay, valores de referencia de la respuesta de la presión arterial sistólica y diastólica durante la realización de un ecocardiograma de estrés con ejercicio físico en cicloergómetro semisupino, en una población sin factores de riesgo ni enfermedades cardiovasculares o comorbilidades conocidas. Se incluye un análisis por sexo, edad y carga de esfuerzo realizada en watts, así como una discusión sobre los determinantes y explicación de los hallazgos con base en la respuesta hemodinámica obtenida y la comparación con resultados internacionales.

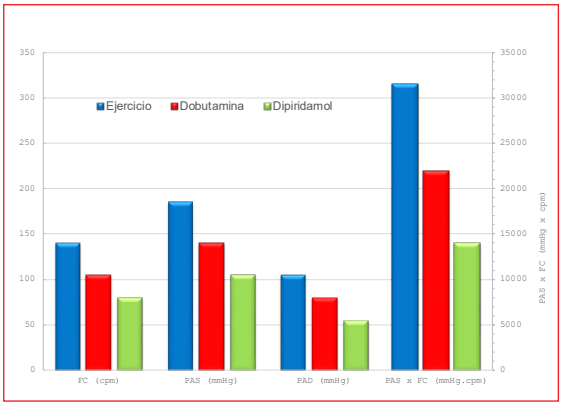


Figura 1. Respuesta hemodinámica alcanzada en estudios de estrés con ejercicio físico, dobutamina y dipiridamol. Modificado de Beleslin BD. Circulation. 1994;90(3):1168-1176. doi:10.1161/01.cir.90.3.1168

Introducción

El ecocardiograma de estrés con ejercicio (EEE) es una técnica ampliamente utilizada para la evaluación de cardiopatía isquémica conocida o sospechada[1]. En los últimos años su uso se ha extendido a la evaluación de la cardiopatía no isquémica, cardiopatía valvular, insuficiencia cardíaca, hipertensión pulmonar, cardiopatías congénitas y a la valoración cardiovascular precompetitiva de deportistas, entre otros[2].

El objetivo de las pruebas de estrés es valorar la respuesta cardiovascular frente a un aumento de la demanda energética, mediante un estímulo que puede ser farmacológico o físico. En condiciones de reposo, el consumo miocárdico de oxígeno (MVO_2) depende principalmente de la frecuencia cardíaca, el estado inotrópico y el estrés parietal ventricular, proporcional a la presión arterial sistólica (PAS). Cuando se comparan las diferentes modalidades de estudios de estrés, el ejercicio físico ha demostrado generar un mayor MVO_2 en comparación con la infusión de dobutamina o la estimulación ventricular mediante marcapasos, debido a un mayor incremento del producto presión arterial sistólica - frecuencia cardíaca (PAS x FC), utilizado como estimador indirecto del consumo miocárdico de oxígeno (Figura 1). A diferencia del ejercicio, los protocolos de estrés con dobutamina aumentan el consumo miocárdico, fundamentalmente por un aumento del inotropismo.

Es importante destacar que la respuesta obtenida mediante el ejercicio físico es menos invasiva, mejor tolerada y se asocia a una menor tasa de complicaciones. Además, reproduce de manera más fiel las respuestas fisiológicas cotidianas, a diferencia de la respuesta obtenida mediante estímulo farmacológico. Por esta razón, y en concordancia con las pautas internacionales vigentes, se recomienda que todo paciente con capacidad para realizar ejercicio y que requiera una prueba de estrés con imagen se realice preferentemente mediante estrés físico[3].

La elección de la ecocardiografía como método de valoración cardiovascular durante el ejercicio físico ofrece múltiples ventajas. En primer lugar, permite una evaluación exhaustiva en reposo de la morfología y la función ventricular (tanto izquierda como derecha), así como de la función valvular y auricular, incluyendo el análisis del *strain* ventricular y de la aurícula izquierda. Asimismo, permite evaluar en tiempo real las modificaciones fisiológicas inducidas por el esfuerzo e identificar respuestas que se apartan de la normalidad.

La ecocardiografía también permite valorar la reserva coronaria mediante la medición de los flujos en los principales vasos epicárdicos utilizando ventanas ultrasónicas adecuadas y la configuración Doppler específica[4].

No obstante, su mayor fortaleza radica en la capacidad de correlacionar la aparición de síntomas con las condiciones de carga, las presiones de llenado, los gradientes valvulares y la detección de nuevas alteraciones segmentarias de la contractilidad, asociadas o no a cambios electrocardiográficos durante la monitorización continua que se realiza en forma simultánea.

El EEE puede llevarse a cabo a través de distintas modalidades, entre las que se incluyen el protocolo en cinta rodante (treadmill, Figura 2A), cicloergómetro en posición vertical (90° respecto al plano horizontal, Figura 2B) y cicloergómetro semisupino, que permite posicionar al paciente en un rango de 0° a 45° respecto al plano horizontal (Figura 2C)[5]. La adquisición de imágenes ecocardiográficas durante el ejercicio en cinta rodante o cicloergómetro en posición vertical resulta técnicamente compleja. Por este motivo, la mayoría de los protocolos contemplan la obtención de imágenes durante la fase inmediatamente posterior al máximo esfuerzo, tras trasladar rápidamente al paciente a una camilla al finalizar el ejercicio. Sin embargo, esta estrategia puede incrementar la tasa de falsos negativos, ya que las alteraciones



Figura 2. Modalidades de prueba de esfuerzo.

segmentarias inducidas durante el máximo estrés podrían atenuarse incluso pocos segundos después de cesar el ejercicio.

De la misma forma, la medición de la presión sistólica pulmonar durante el esfuerzo constituye un parámetro útil para la valoración de la función diastólica y de la repercusión hemodinámica de las valvulopatías durante el estrés. La presión pulmonar puede aumentar precozmente ante el incremento de las presiones de llenado y/o la presencia de una lesión valvular significativa, mientras que su descenso se produce rápidamente durante el posesfuerzo. Por este motivo, su análisis tardío puede subestimar la magnitud de la respuesta hemodinámica y, potencialmente, la severidad de la patología subyacente[6].

Por el contrario, la estabilidad del paciente que se obtiene en cicloergómetros semisupinos, con el dorso apoyado sobre el plano inclinado del cicloergómetro, permite la adquisición continua de imágenes ecocardiográficas en múltiples planos durante todas las etapas del esfuerzo, incluido el máximo estrés. Además, la posibilidad de lateralizar el cicloergómetro hacia la izquierda hasta 30° favorece aún más la obtención de imágenes ecocardiográficas óptimas, particularmente de las ventanas paraesternal y apical.

Adicionalmente, hay que considerar que las diferentes modalidades de ejercicio físico no generan la misma respuesta hemodinámica. El ejercicio en cicloergómetro vertical o semisupino genera una menor frecuencia cardíaca máxima y una menor capacidad funcional en comparación con el realizado en cinta rodante, debido principalmente a la fatiga muscular de los miembros inferiores, fundamentalmente en la posición semisupina. Sin embargo, se asocia a un incremento más pronunciado de la presión arterial[7].

Si bien esta característica podría considerarse una limitación, se compensa por la aparición más temprana de isquemia a menores cargas, lo que se explica por un aumento del volumen telediastólico (mayor precarga respecto a la cinta rodante) y por una presión arterial media más elevada en cada etapa del ejercicio en la posición semisupina. Estas condiciones favorecen un incremento del estrés parietal, directamente relacionado con el aumento del consumo miocárdico de oxígeno en comparación con el cicloergómetro vertical[8,9].

Varios autores han demostrado que los sujetos que presentan una respuesta presora hipertensiva (RPH) durante una prueba de estrés con ejercicio tienen un riesgo más elevado de desarrollar hipertensión arterial (HTA) con daño de órgano blanco y enfermedad cardiovascular en el seguimiento[10,11]. Estos hallazgos también fueron observados en el registro Framingham en un seguimiento a 8 años[12].

La presencia de una respuesta presora hipertensiva durante una prueba de estrés puede llevar a resultados falsos positivos[13]. Shin y col. analizaron 464 sujetos sometidos a cateterismo cardíaco luego de presentar un ecocardiograma de estrés con ejercicio positivo. Se observó que el 13% de los pacientes no presentaba enfermedad coronaria significativa, definida como estenosis coronaria > 50%. En este grupo, el promedio de presión arterial sistólica al máximo estrés fue significativamente mayor que en el grupo de sujetos con resultados verdaderos positivos. A mayor nivel de presión arterial se observó un mayor descenso en la especificidad del test sin cambios en la sensibilidad. Los hombres mostraron una disminución de la especificidad con valores máximos de PAS ≥ 200 mmHg, mientras que las mujeres mostraron un descenso de la especificidad con valores de PAS ≥ 180 mmHg[14].

Tradicionalmente, los pacientes con resultados falsos positivos durante un ecocardiograma de estrés fueron considerados un grupo de pacientes con menor riesgo cardiovascular. Sin embargo, existe cada vez más evidencia que sugiere un riesgo cardiovascular superior en estos, en comparación con el grupo con resultado negativo, independiente-

mente de los hallazgos angiográficos[15,16].

A pesar de la importancia de identificar una respuesta presora exagerada frente al ejercicio, existe una considerable heterogeneidad entre los estudios publicados, tanto en su definición como en los puntos de corte empleados. Se han utilizado criterios basados en valores absolutos de presión arterial, independientemente de la edad, como una presión arterial sistólica (PAS) ≥210 mmHg en hombres y ≥190 mmHg en mujeres al máximo esfuerzo[17], o una PAS ≥200 mmHg y/o un incremento de la presión arterial diastólica ≥10 mmHg hasta alcanzar valores >90 mmHg[10]. Sin embargo, debido a la influencia de la edad y el sexo sobre la respuesta presora al ejercicio, se ha propuesto definir la respuesta hipertensiva como una PAS ≥ percentil 90 de los valores de referencia específicos para edad y sexo[17-19].

En este sentido, Daida y cols. publicaron en 1996 valores de referencia de respuesta presora por sexo y edad en pruebas de estrés ergométrico con treadmill utilizando protocolo de Bruce, definiendo como punto de corte diagnóstico de RPH alcanzar una presión mayor al percentil 90[19]. Muchos de los trabajos publicados en la bibliografía lo utilizan como referencia y posiblemente sea la tabla de referencia más utilizada en nuestro medio para la interpretación de ergometrías y extrapolada también a otros estudios de estrés. Estos datos, si bien consideran las diferencias de sexo y edad, no consideran la carga de esfuerzo realizada por el sujeto, tal como lo sugieren las guías de práctica clínica en pruebas de estrés[20]. Recientemente, Hedman y cols. publicaron valores de referencia de presión arterial sistólica durante ergometría con cicloergómetro supino a 90º, considerando la carga de esfuerzo realizada según sexo y edad[21]. La heterogeneidad existente en la literatura respecto a la definición de RPH al ejercicio limita su aplicabilidad clínica.

En nuestro medio cada vez más centros realizan EEE en cicloergómetro semisupino y no existen en Uruguay ni en la región valores de referencia de respuesta presora para este estudio. Este hecho sugiere la relevancia de contar con valores de referencia nacionales que permitan utilizar esta herramienta diagnóstica en expansión, considerando datos obtenidos con pacientes de la vida real y con características sociodemográficas extrapolables a la población.

Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo general analizar los cambios de presión arterial braquial sistólica y diastólica (PAS/PAD) durante la realización de un ecocardiograma de estrés con esfuerzo físico en cicloergómetro semisupino, en una población uruguaya sin factores de riesgo ni enfermedad cardiovascular (ECV) conocida.

Los objetivos específicos son:

- Analizar las variaciones absolutas y relativas de la presión arterial braquial desde condiciones basales hasta el máximo esfuerzo y determinar su relación con la carga de ejercicio realizada, considerando las diferencias entre sexos y grupos etarios.
- Identificar las variables que presentan mayor influencia sobre la magnitud de la respuesta presora durante el esfuerzo.
- Describir y analizar las modificaciones del gasto cardíaco, resistencia vascular sistémica y frecuencia cardíaca a lo largo del ejercicio ergométrico, evaluando su contribución al comportamiento presor observado.

En este trabajo nos propusimos elaborar tablas y gráficos con valores de referencia de esta población y compararlos con la bibliografía actual.

Materiales y método

Se realizó un estudio retrospectivo de una cohorte que incluyó a todos los pacientes que concurrieron al laboratorio de ecocardiografía de estrés con ejercicio (EEE) de nuestro centro entre marzo de 2019 y febrero de 2025. En total, se estudiaron 7248 sujetos de entre 18 y 85 años, de los cuales el 42% fueron mujeres. Todos los estudios fueron solicitados por el médico tratante, independientemente de nuestro grupo de investigación.

Previo a cada prueba de esfuerzo, se realizó una evaluación clínica que incluyó la revisión de la historia clínica y el registro de antecedentes personales y familiares, procedimientos cardiológicos previos, medicación habitual y síntomas. Asimismo, el peso y la talla fueron registrados por personal de enfermería como parte del protocolo asistencial habitual y posteriormente utilizados para el cálculo del índice de masa corporal y del área de superficie corporal.

Se establecieron como criterios de exclusión la ausencia de consentimiento para la realización del estudio o para el uso de los datos obtenidos, la imposibilidad de realizar ejercicio físico y la presencia de factores de riesgo cardiovascular tradicionales, con excepción del sexo. En consecuencia, fueron excluidos los sujetos con hipertensión arterial, diabetes mellitus, dislipemia (o en tratamiento farmacológico para cualquiera de estas condiciones), tabaquismo, antecedentes de cardiopatía isquémica o valvular, fibrilación o flutter auriculares, dispositivos cardíacos implantados, insuficiencia cardíaca, cardiopatías congénitas, accidente cerebrovascular previo o cualquier otra condición cardiovascular que constituyera una contraindicación para el estudio. A su vez, fueron excluidos del análisis final aquellos sujetos con presión arterial sistólica menor a 80 mmHg o mayor a 200 mmHg en la fase de reposo previo al inicio del ejercicio y los que hayan logrado un tiempo de ejercicio menor a 3 minutos o desarrollado una carga máxima

menor a 50 watts. Finalmente, los pacientes con resultado positivo para el diagnóstico de isquemia miocárdica de moderado y alto riesgo también fueron excluidos del análisis final. En la Figura 3 se detalla la prevalencia de estos criterios en nuestra población.

El ejercicio se realizó en cicloergómetro Ergoselect 1200, en posición semisupina a 45º, asociado con un Sistema de Evaluación Cardíaca durante test de ejercicio (CASE, por su sigla en inglés). Este dispositivo permite analizar el trazado electrocardiográfico de 12 derivaciones en tiempo real, medir la presión arterial de forma automática por método oscilométrico a través de un brazalete posicionado en el brazo derecho y apoyado sobre un soporte ergonómico para mantenerlo relajado durante todo el estudio y a la altura de referencia cardíaca. Además, aporta información del tiempo de ejercicio, cadencia de pedaleo y carga en watts en tiempo real.

La fase inicial del protocolo consiste en un período de reposo de 20 minutos en el que se adquieren las imágenes ecocardiográficas basales gatilladas con ECG. Para ello utilizamos un ecógrafo General Electric modelo S70N y transductor M5Sc-D de 1,5 a 4,6 MHz. En esta etapa, se realiza un estudio ecocardiográfico completo siguiendo las recomendaciones internacionales donde se analiza la contractilidad ventricular, las medidas lineales y volumétricas del ventrículo izquierdo, gasto cardíaco (GC), resistencia vascular sistémica (RVS) y parámetros de función diastólica[22]. Durante esta fase se realizan tres mediciones de PA para comprobar su estabilidad y se computa el promedio de estas. El consultorio permanece a temperatura controlada durante todo el estudio.

El protocolo de esfuerzo utilizado durante la etapa de ejercicio fue individualizado de acuerdo con la edad y el nivel de actividad física habitual de cada sujeto. El objetivo fue alcanzar el mayor nivel de esfuerzo posible, procurando obtener la máxima capacidad funcional individual y una respuesta cronotrópica adecuada, en una duración de la fase de ejercicio de aproximadamente 6 a 12 minutos. Se consideró aceptable alcanzar al menos el 85% de la frecuencia cardíaca máxima teórica. El

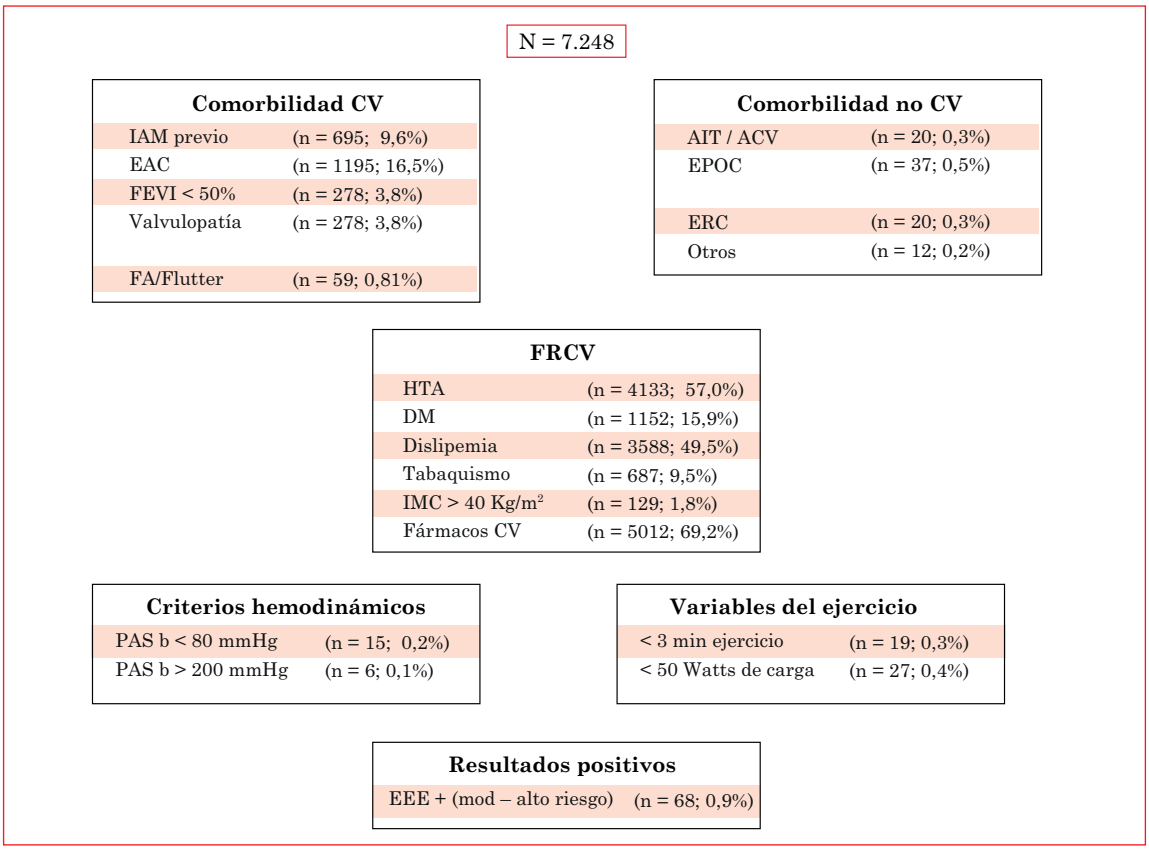


Figura 3. Criterios de exclusión del protocolo de análisis. Los valores se expresan como número absoluto y frecuencia relativa (%). CV: cardiovascular; IAM: infarto agudo de miocardio; EAC: enfermedad arterial coronaria; FEVI: fracción de eyección del ventrículo izquierdo; AIT: accidente isquémico transitorio; ACV: accidente cerebrovascular; EPOC: enfermedad pulmonar obstructiva crónica; ERC: enfermedad renal crónica; HTA: hipertensión arterial; DM: diabetes mellitus; IMC: índice de masa corporal; PASb: presión arterial sistólica basal; EEE+(mod-alto riesgo): ecocardiograma de estrés con ejercicio positivo para isquemia de riesgo moderado o alto.

protocolo estándar consistió en una carga inicial de 25 W, con incrementos de 25 W cada 2 minutos, de acuerdo con los protocolos recomendados para la realización de EEE[1]. En función de la capacidad funcional estimada durante la anamnesis, se utilizaron dos esquemas alternativos de progresión de carga. En individuos con menor capacidad física referida, se empleó una carga inicial de 20 W, con incrementos de 10 W cada 2 minutos. Por el contrario, en sujetos que realizaban actividad física de forma regular o en deportistas de alto rendimiento, se utilizaron incrementos de 50 W cada 2 minutos, con el objetivo de alcanzar un nivel máximo de esfuerzo dentro del intervalo de tiempo previsto[23].

Los criterios para finalizar la prueba son: a) alcanzar un esfuerzo percibido como máximo por el paciente; b) ocurrencia de arritmias potencialmente graves; c) hipertensión severa; d) hipotensión sintomática; e) deseo del paciente de finalizar el estudio; o f) presencia de alteraciones clínicas, electrocardiográficas o ecocardiográficas de alto riesgo isquémico.

El GC se estimó mediante parámetros ecocardiográficos de acuerdo con la siguiente fórmula:

GC = (IVT TSVI x área TSVI) x FC, donde IVT es la integral velocidad-tiempo y el TSVI, el tracto de salida del ventrículo izquierdo. La resistencia vascular sistémica se calculó como:

RVS = [(PAM − PADer) / GC] × 80. La presión arterial media (PAM) se estimó a partir de la fórmula: PAM = (PAS - PAD) / 3 + PAD[24].

Las variables de ejercicio consideradas fueron el objetivo de carga en watts (de acuerdo con el sexo, la edad y el peso), aportado por el software de General Electric, carga alcanzada, porcentaje de carga alcanzada y tiempo de ejercicio. La frecuencia cardíaca máxima (FCM) fue estimada a partir de la ecuación: FCM=220-edad y a partir de esta se consideró el 85% como punto de corte para establecer la prueba como suficiente.

El incremento de presión arterial durante el ejercicio se calculó como la diferencia entre la PA máxima y PA basal. Se definió como PA máxima el valor registrado en la última etapa de ejercicio, correspondiente a la carga máxima alcanzada.

Adicionalmente, se evaluó la respuesta de la presión arterial sistólica (PAS) en relación con la carga de ejercicio mediante el cálculo de la pendiente de ΔPAS / Δcarga. Esta se definió como la diferencia entre la PAS máxima y la PAS registrada en la primera etapa de ejercicio, dividida por la diferencia entre la carga máxima y la carga correspondiente a la etapa 1, expresada en mmHg/W.

ΔPAS / Δcarga = (PAS máx − PAS etapa 1) / (Carga máx − Carga etapa 1).

A diferencia de la relación PAS/carga, que describe la PAS en función de la carga alcanzada, la pendiente ΔPAS/Δcarga permite cuantificar la magnitud del incremento de la PAS por unidad de incremento de la carga de ejercicio.

Asimismo, se estimó el producto PAS × FC como indicador clásico del consumo miocárdico de oxígeno.

Todos los estudios fueron realizados por cardiólogos con experiencia en estudios imagenológicos de estrés y enfermería con capacitación en soporte vital avanzado siguiendo las recomendaciones internacionales[2]. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Asociación Española y realizado de acuerdo con las normas de la Declaración de Helsinki. Todos los participantes fueron informados acerca de las características de la prueba y firmaron consentimiento informado.

Análisis estadístico

Todas las variables del estudio fueron ingresadas en un sistema de informe y base de datos diseñados por este grupo. El procesamiento de datos fue realizado mediante el software IBM SPSS Statistics versión 25.

La normalidad de las variables se comprobó mediante test de Kolmogorov-Smirnov. Utilizamos prueba t para comparar medias según sexo. Se calcularon ecuaciones de regresión lineal múltiple (RLM) de PAS y PAS/carga por sexo, ingresamos como variables independientes aquellas con $p < 0,05$ y que aumentan el R2 al modelo. Consideramos como estadísticamente significativo una $p < 0,05$.

Los datos se expresan como valor medio y límites del intervalo de confianza del 95% (gráficos) o desvío estándar (tablas). Se calcularon los percentiles 5, 25, 50, 90 y 95 de presión arterial sistólica y diastólica.

Clasificamos los grupos de acuerdo con su década de edad entre los 30 y 69 años y en intervalos de 15 años para los < 30 y > 70 años.

Resultados

Las características generales de la población se resumen en la Tabla 1. El análisis final incluyó 1.582 sujetos sin factores de riesgo cardiovascular ni antecedentes conocidos de enfermedad cardiovascular, de los cuales el 49,6% fueron mujeres. La edad promedio fue de 50,1 años en los hombres y 55,0 años en las mujeres ($p < 0,001$). En cuanto a las variables antropométricas, los hombres presentaron un índice de masa corporal significativamente superior al de las mujeres.

En la comparación entre sexos, los hombres presentaron valores más elevados de presión arterial en reposo (PA 120 ± 17 vs. 113 ± 17 mmHg), así como mayor presión arterial sistólica (PAS) máxima (193 ± 26 vs. 172 ± 24 mmHg), carga máxima alcanzada (151 ± 48 vs. 93 ± 28 W) y tiempo total de ejercicio (10,4 ± 2,7 vs. 7,4 ± 2,0 minutos) en comparación con las mujeres ($p < 0,001$).

Tabla 1. Características clínicas, ecocardiográficas y hemodinámicas de la población de referencia.

	Hombres (n = 797) Media ± DS	Mujeres (n = 785) VM ± DS	p
Edad (años)	50,1 ± 16,3	55,0 ± 12,9	< 0,001
Peso (Kg)	82,7 ± 14,3	68,1 ± 12,5	< 0,001
Altura (m)	1,76 ± 0,08	1,62 ± 0,07	< 0,001
IMC (Kg/m2)	26,7 ± 4,0	25,9 ± 4,4	< 0,001
ASC (m2)	2,0 ± 0,2	1,7 ± 0,2	< 0,001
Ecocardiograma basal			
Masa VI (g/m^2)	86,1 ± 19,2	73,9 ± 17,9	< 0,001
VFD VI index (ml/m^2)	51,4 ± 14,6	42,7 ± 10,9	< 0,001
VFS VI index (ml/m^2)	19,5 ± 6,6	15,5 ± 5,0	< 0,001
FEVI (%)	62,4 ± 5,0	64,0 ± 5,2	< 0,001
Vol. AI (ml/m^2)	28,1 ± 7,6	25,9 ± 7,3	< 0,001
Relación E/e´ mitral	8,0 ± 2,2	9,0 ± 2,5	< 0,001
GC (L/min)	5,2 ± 1,6	5,2 ± 1,3	0,74
Variables en reposo			
PAS (mmHg)	120 ± 17	113 ± 17	< 0,001
PAD (mmHg)	75 ± 12	72 ± 12	< 0,001
FC (cpm)	77 ± 15	82 ± 14	< 0,001
PAS x FC (mmHg*cpm)	9239 ± 2324	9328 ± 2373	0,45
RVS (dinas.seg.cm^{-5})	1465 ± 525	1351 ± 386	< 0,001
Variables en ejercicio			
Carga objetivo (W)	182 ± 32	120 ± 17	< 0,001
Carga alcanzada (W)	151 ± 48	93 ± 28	< 0,001
% carga alcanzada	84 ± 23	82 ± 27	0,05
Tiempo ejercicio (min)	10,4 ± 2,7	7,4 ± 2,0	< 0,001
PAS máx (mmHg)	193 ± 26	172 ± 24	< 0,001
PAD máx (mmHg)	92 ± 13	90 ± 14	< 0,001
PAS x FC (mmHg*cpm)	28574 ± 6647	25337 ± 4546	< 0,001
% FCMT alcanzada	89,2 ± 6,6	89,7 ± 7,3	0,15
GC máx (Lt/min)	11,2 ± 3,3	11,6 ± 3,0	0,1
RVS (dinas.seg.cm^{-5})	976,0 ± 340,0	837,0 ± 213,0	<0,001

Valores expresados como media ± desvío estándar (DS). IMC: Índice de masa corporal; ASC: Área de superficie corporal. VI: Ventriculo izquierdo.VFD VI /VFS VI: Volumen de fin de diástole y sistole del ventrículo izquierdo. Vol AI: Volumen de la auricula izquierda. GC: Gasto cardiaco. PAS/PAD: Presión arterial sistólica y diastólica. FC: frecuencia cardíaca; RVS: Resistencia vascular sistémica; FCMT: Frecuencia cardíaca máxima teórica.
Una p<0,05 fue considerada estadísticamente significativa (test de Student; SPSS Statistics).

Comportamiento de la presión arterial durante el esfuerzo

La Figura 4 muestra las curvas de referencia de la PAS máxima (panel A), incremento absoluto de PAS (panel B) y la carga máxima alcanzada (panel C), expresadas como valor medio con sus límites del intervalo de confianza del 95% y percentil 90 de cada variable.

La PAS máxima aumentó progresivamente a partir de los 30 años en ambos sexos, alcanzó su valor más alto entre los 50-59 años en hombres y entre los 60-69 años en mujeres, y comenzó a descender en los mayores de 70 años (Figura 4A).

El incremento absoluto de PAS presentó un patrón más atenuado, con un pico entre los 40-49 años y una disminución a edades superiores (Figu-

ra 4B). En nuestra serie, la PAS máxima coincidió con la registrada en la última etapa del esfuerzo en todos los casos, sin observarse respuesta hipotensiva al esfuerzo máximo.

Por su parte, la carga máxima de ejercicio fue mayor en el grupo de 30-39 años, con una reducción progresiva conforme aumenta la edad en ambos sexos (Figura 4C).

Relación presión arterial sistólica-carga

En la Figura 5 se representa la pendiente de la respuesta de la presión arterial sistólica en relación con el incremento de la carga de ejercicio, expresada como ΔPAS/Δcarga (mmHg/W), según sexo y grupo etario. Las líneas continuas representan los valores medios (VM) con sus respectivos intervalos de confianza del 95% (IC 95%), mientras que las líneas discontinuas representan el percentil 90 (p90) de la distribución.

En el análisis global, la pendiente ΔPAS/Δcarga fue significativamente mayor en las mujeres que en los hombres (1,0 ± 0,5 vs. 0,7 ± 0,4 mmHg/W; $p < 0,001$). Esta diferencia se observó en todos los grupos etarios y mostró una tendencia a incrementarse con la edad en ambos sexos. En las mujeres, el valor medio aumentó progresivamente desde 0,51 mmHg/W en el grupo <30 años hasta 0,84 mmHg/W en el grupo de 70–85 años. Este comportamiento fue aún más marcado al analizar el percentil 90 de la distribución. En las mujeres, el p90 aumentó desde aproximadamente 0,79 mmHg/W en las menores de 30 años hasta 1,80 mmHg/W en el grupo de 70–85 años, mientras que en los hombres aumentó desde 0,62 hasta 1,01 mmHg/W, respectivamente.

Estos hallazgos muestran que el incremento de la PAS por unidad de incremento de la carga de ejercicio aumenta con la edad y es consistentemente mayor en mujeres. La marcada elevación de los valores correspondientes al p90, particularmente en mujeres de mayor edad, pone de manifiesto un desplazamiento hacia valores más elevados de la pendiente ΔPAS / Δcarga en el extremo superior de la distribución.

Respuesta presora según carga y edad

La Figura 6 ilustra la relación entre PAS y carga de ejercicio expresada en watts. En el Panel A, la PAS aumentó de forma aproximadamente lineal con el incremento de la carga de trabajo en ambos sexos. Si bien las mujeres presentaron valores de PAS inicialmente inferiores a los de los hombres, la pendiente de incremento fue más pronunciada, determinando una reducción progresiva de la diferencia entre sexos y su posterior inversión a partir de cargas relativamente bajas (50-60 W). Esta divergencia se hizo más evidente a medida que aumentó la intensidad del ejercicio.

El Panel B representa la misma relación estratificada por edad, sin distinción de sexos. En todos los grupos etarios, la PAS se incrementó progresivamente con la carga, aunque la magnitud de la respuesta aumentó con la edad. Los sujetos menores de 39 años presentaron valores absolutos de PAS más bajos de acuerdo con la carga. A partir de los 40 años, cada grupo etario mostró una presión basal más elevada y una respuesta presora más acentuada de acuerdo con la carga respecto al gru-

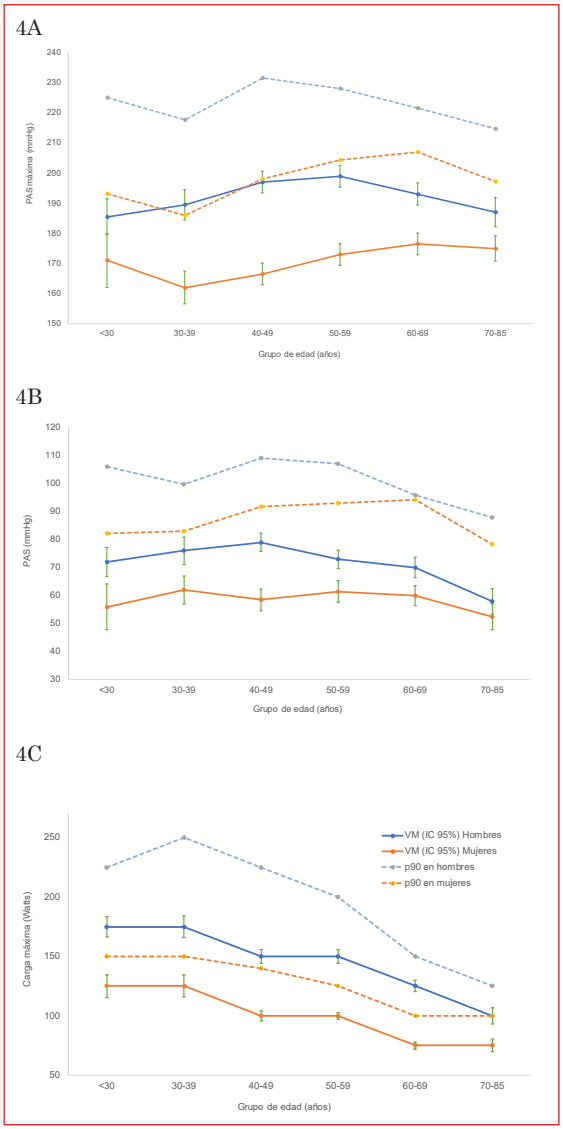


Figura 4. Valores de referencia de la respuesta presora sistólica y perfil de carga máxima de ejercicio alcanzada según edad y sexo. Panel (A) Presión arterial sistólica máxima, (B) incremento máximo de PAS (PAS máx - PAS basal) y (C) carga máxima alcanzada en Watts. Las líneas continuas representan los valores medios (VM) y su intervalo de confianza del 95% (IC 95%), mientras que las líneas discontinuas representan el percentil 90 según sexo (hombres en azul y mujeres en naranja) y edad.

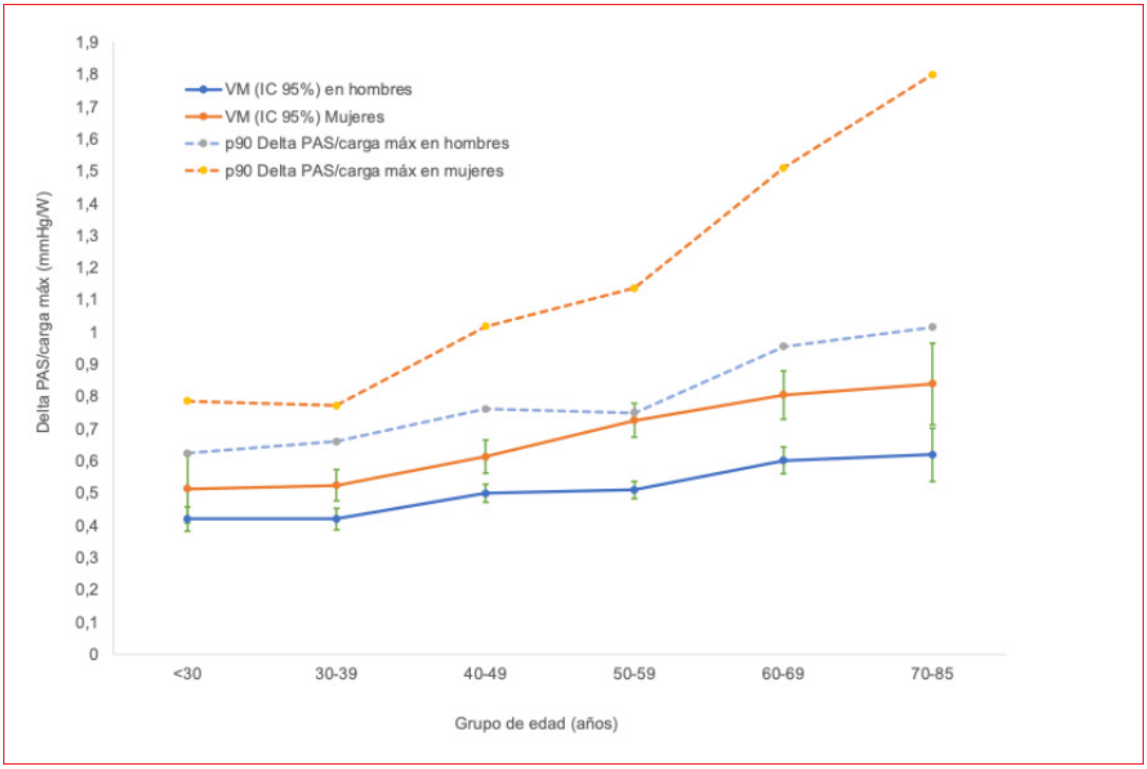


Figura 5. Valores de referencia de la relación entre incremento de la presión arterial sistólica y la carga máxima de ejercicio según edad y sexo.
Se expresa VM e IC (95%) de Delta PAS/carga en líneas continuas y percentil 90 (líneas discontinuas) según grupo etario y sexo (hombres en azul y mujeres en naranja).

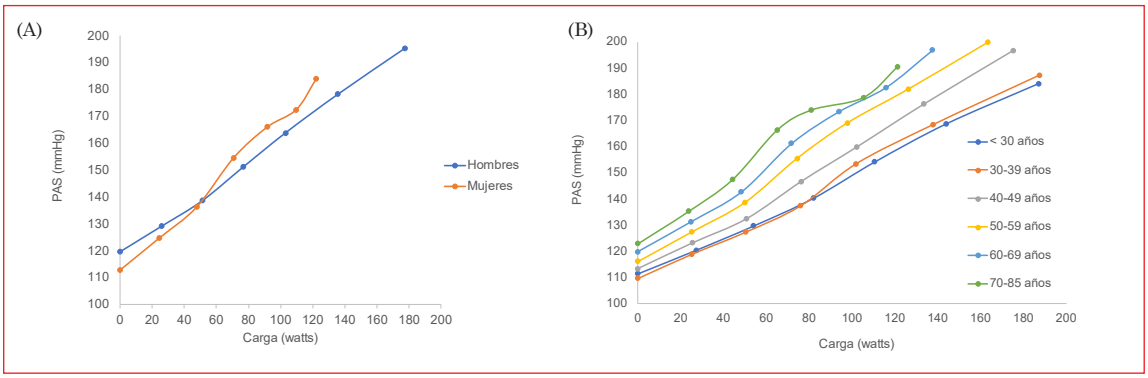


Figura 6. Incremento de presión arterial sistólica en función de la carga de ejercicio según sexo (A) y discriminado según grupo etario (B).

po etario previo. A una misma carga, los valores de PAS fueron consistentemente superiores en los grupos de mayor edad.

Determinantes hemodinámicos

Con el fin de explorar los determinantes hemodinámicos de la respuesta presora, se analizó el gasto cardíaco (GC) y la resistencia vascular sistémica (RVS) durante el ejercicio (Figuras 7 y 8).

El gasto cardíaco (GC) se incrementó significativamente desde el reposo hasta el esfuerzo máximo, sin observarse diferencias significativas entre sexos. En reposo, el GC global fue similar en hombres y mujeres (5,2 ± 1,6 L/min vs. 5,2 ± 1,3 L/min; p = 0,74), y al máximo esfuerzo se alcanzaron valores de 11,2 ± 3,3 L/min y 11,6 ± 3,0 L/min, respectivamente (p = 0,10).

Al analizar el comportamiento por grupos eta-

rios, el incremento del GC con el ejercicio se observó en todas las edades; sin embargo, el GC máximo mostró una disminución progresiva con el aumento de la edad, lo que se tradujo en una respuesta hemodinámica absoluta reducida al esfuerzo máximo en los grupos etarios mayores. En términos relativos, los grupos etarios más jóvenes (< 30 y 30-39 años) presentaron incrementos del orden del 120-134% respecto al valor basal, mientras que en el grupo de mayor edad (70-85 años) el aumento relativo fue menor, sin llegar a duplicar el GC de reposo (Figura 7).

La Figura 8 muestra los valores de resistencia vascular sistémica (RVS) en reposo y durante el esfuerzo máximo, estratificados por sexo y grupo etario. En condiciones basales (líneas continuas), la RVS fue mayor en los hombres (línea azul continua) que en las mujeres (línea naranja continua), observándose en ambos sexos un incremento progresivo con la edad, de menor magnitud en las mujeres.

Durante el esfuerzo máximo (líneas discontinuas), la RVS disminuyó significativamente en todos los grupos etarios; no obstante, la magnitud del descenso relativo respecto al reposo fue menor con el aumento de la edad. En el grupo etario más joven (< 30 años), la reducción de la RVS fue del 36% en hombres y del 38% en mujeres, mientras que en el grupo de mayor edad (70-85 años) el descenso alcanzó el 22% y el 35%, respectivamente.

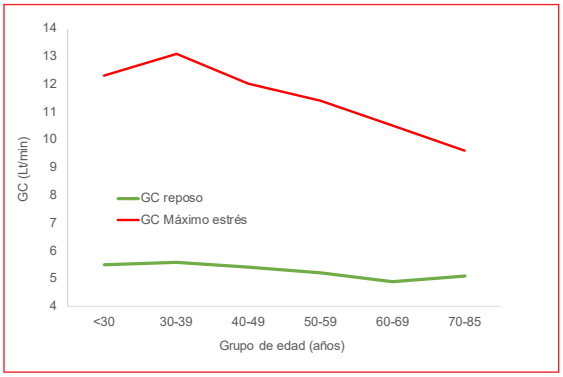


Figura 7. Gasto cardíaco en reposo y durante el máximo estrés según grupo etario. Gasto cardiaco en reposo (curva verde) y durante el máximo estrés (curva roja). Los resultados se presentan para la población global, sin discrminación por sexo, dado que no se observaron diferencias estadísticamente significativas según sexo.

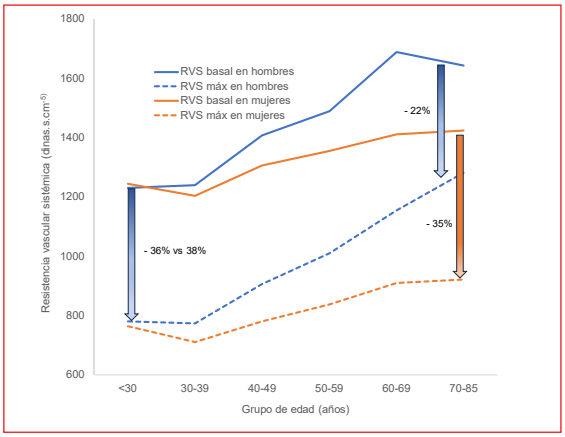


Figura 8. Cambio de la resistencia vascular sistémica (RVS) del reposo al máximo estrés según sexo y grupo etario. Los valores en reposo se representan mediante líneas continuas y los correspondientes al máximo estrés mediante líneas discontinuas (hombres en azul y mujeres en naranja). Las flechas indican el cambio porcentual máximo de disminución de la RVS entre el reposo y el máximo estrés, observado en los grupos etarios de menores de 30 años y 70-85 años.

Frecuencia cardíaca y producto presión – frecuencia cardíaca

La Figura 9 muestra el comportamiento de la frecuencia cardíaca máxima (FC máx., líneas continuas) y del producto PAS × FC (líneas discontinuas) según sexo y grupo etario. La FC máxima presentó un descenso progresivo con el aumento de la edad, sin observarse diferencias significativas entre hombres y mujeres.

El producto PAS × FC también evidenció una tendencia decreciente con la edad; sin embargo, los hombres alcanzaron valores significativamente mayores que las mujeres en los grupos etarios menores de 60 años, diferencia que se atenuó en los grupos de mayor edad.

Modelos de regresión lineal múltiple

El análisis de regresión lineal múltiple permitió

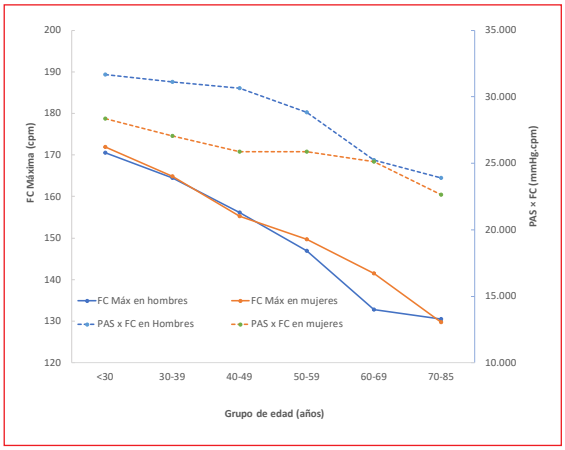


Figura 9. Comportamiento de la frecuencia cardíaca máxima y del producto PAS x FC durante el ejercicio según sexo y grupo etario. La FC máx se expresa como ciclos por minuto (cpm) y el producto PAS x FC en mmHg.cpm. Las lineas continuas representan la FC máxima y las líneas discontinuas el producto PAS x FC según sexo (hombres azul y mujeres naranja) y edad.

identificar los determinantes independientes de la relación presión arterial sistólica/carga (PAS/carga) durante el ejercicio. Entre las variables analizadas, la edad, la presión arterial sistólica basal, la carga máxima alcanzada y la duración total del ejercicio se asociaron de manera significativa e independiente con el valor de la relación PAS/carga, tanto en hombres como en mujeres.

En el modelo ajustado para hombres, la ecuación resultante fue:

ΔPAS/Δcarga = 2,692 + 0,008 x edad(años) + 0,007 x PAS basal(mmHg) − 0,017 x carga máxima(W) − 0,049 x duración prueba(min); $r^2 = 0,619$

En este modelo, la edad y la PAS basal mostraron una asociación positiva con la relación PAS/carga, mientras que la carga máxima y la duración del ejercicio presentaron asociaciones inversas, lo cual indica que los sujetos con mayor capacidad de esfuerzo y pruebas de mayor duración presentan una respuesta presora más eficiente por unidad de carga.

En el modelo correspondiente a mujeres, la ecuación de regresión fue:

ΔPAS/Δcarga = 2,135 + 0,030 x edad (años) + 0,006 x PAS basal (mmHg) − 0,008 x carga máx (W) − 0,044 x duración prueba (min); $r^2 = 0,641$

De modo similar, la edad y la PAS basal se asociaron positivamente con la relación PAS/carga durante el esfuerzo, mientras que la capacidad de trabajo y la duración del ejercicio mantuvieron una relación inversa. Cabe destacar que el coeficiente de la edad fue aproximadamente cuatro veces mayor en mujeres que en hombres (0,030 vs. 0,008), lo que sugiere una influencia más pronunciada del envejecimiento sobre la respuesta presora femenina.

Tablas de referencia

Finalmente se construyeron tablas de referencia de PAS/PAD máxima (Tablas 2A y 3A), incremento de PAS/PAD (Tablas 2B y 3B) y ΔPAS/Δcarga, ΔPAD/Δcarga (Tablas 2C y 3C), estratificadas por sexo y grupo etario. Los valores se expresaron en percentiles, lo cual permitió definir límites de normalidad y puntos de corte aplicables a la práctica clínica.

Discusión

El presente estudio constituye, hasta donde alcanza nuestro conocimiento, la primera descripción sistemática de la respuesta hemodinámica al esfuerzo físico en cicloergómetro en posición semisupina, realizada en una cohorte de adultos sin factores de riesgo cardiovascular ni enfermedad conocida, en Uruguay y en la región. A partir de una muestra amplia y homogénea se elaboraron valores de referencia de presión arterial sistólica (PAS) y diastólica (PAD) durante el esfuerzo, estratificados por sexo, edad y carga desarrollada, con especial énfasis en la relación presión arterial/carga (mmHg/W). Esta aproximación permite una interpretación más fisiológica e individualizada de la respuesta presora frente al ejercicio.

Comparación con estudios previos y contexto metodológico

La mayoría de las referencias internacionales disponibles sobre respuesta presora provienen de estudios realizados en treadmill o en cicloergómetros a 90 grados, predominantemente en poblaciones europeas o norteamericanas[9,19,21,25]. En la Tabla 4 se presentan los valores medios (± desvío estándar) de presión arterial sistólica máxima reportados en estudios internacionales y los correspondientes valores observados en nuestra cohorte, estratificados por sexo, grupo etario y modalidad de esfuerzo. Hasta la fecha, no se habían publicado reportes que caracterizaran la respuesta hemodinámica al ejercicio en cicloergómetro semisupino en adultos, lo que confiere a esta investigación un aporte metodológico novedoso. Esta modalidad de esfuerzo modifica la carga hemodinámica y la redistribución del gasto cardíaco, lo cual genera diferencias fisiológicas sustanciales respecto a las pruebas convencionales[26,27].

En nuestra cohorte, la PAS máxima mostró un incremento progresivo hasta los 50-59 años en hombres y 60-69 años en las mujeres, seguido de un descenso posterior. Este patrón contrasta con el aumento sostenido descrito por Daida et al.(19) y puede explicarse por la interacción entre los determinantes centrales y periféricos de la presión arterial. Los individuos de mayor edad presentaron valores basales de resistencia vascular sistémica (RVS) más elevados y una menor reducción relativa de la RVS durante el ejercicio, junto con un incremento más limitado del gasto cardíaco (GC), lo que determina un aumento de PAS más atenuado. Este comportamiento, sumado a la mayor PAS basal, explica el perfil amortiguado del incremento tensional observado con la edad.

Diferencias por sexo y factores determinantes de la respuesta presora

Se observó una relación PAS/carga significativamente mayor en mujeres, con una tendencia ascendente con la edad. Estas diferencias persistieron luego del ajuste por carga y duración del ejercicio, lo que sugiere mecanismos diferenciales de adaptación vascular entre sexos. La menor reserva vasodilatadora periférica y la mayor rigidez arterial descritas con el envejecimiento, particularmente en mujeres después de la menopausia, podrían contribuir a una respuesta presora más acentuada[28]. El análisis multivariable confirmó que la edad, la presión basal y la carga máxima alcanzada son los

Tabla 2 A. Valores de referencia de presión arterial máxima durante el ejercicio según grupo etario en hombres.

Grupo de edad (años)	< 30	30 - 39	40 - 49	50 - 59	60 - 69	70 - 85
N	100	84	187	176	155	95
PAS máxima durante el esfuerzo (mmHg)						
Media ± DS	186 ± 30	189 ± 23	197 ± 25	198 ± 26	193 ± 23	185 ± 24
Mediana	186	190	197	199	193	187
p5	142	152	158	160	154	146
p25	165	175	182	179	177	171
p90	225	218	232	228	222	215
p95	233	228	239	241	229	223
PAD máxima durante el esfuerzo (mmHg)						
Media ± DS	92 ± 13	88 ± 13	93 ± 12	95 ± 13	96 ± 11	94 ± 12
Mediana	91	86	91	94	95	93
p5	74	73	75	75	79	79
p25	83	81	84	86	89	84
p90	109	99	108	112	109	109
p95	115	104	117	116	114	122
FC (cpm)	171 ± 10	165 ± 9	156 ± 10	147 ± 22	133 ± 33	130 ± 19
PAS × FC	31686 ± 5336	31102 ± 4214	30659 ± 5052	28831 ± 6902	25248 ± 7692	23906 ± 5221

Valores expresados como media ± desvío estándar, mediana y percentiles 5, 25, 90 y 95. PAS/PAD: presión arterial sistólica y diastólica.

Tabla 2 B. Valores de referencia del incremento de la presión arterial con el ejercicio según grupo etario en hombres.

Grupo de edad (años)	< 30	30 - 39	40 - 49	50 - 59	60 - 69	70 - 85
n	100	84	187	176	155	95
Incremento de PAS desde el reposo al máximo estrés (mmHg)						
Media ± DS	74 ± 26	75 ± 23	80 ± 23	75 ± 24	69 ± 22	59 ± 23
Mediana	72	76	79	73	70	58
p5	36	36	46	39	31	21
p25	56	58	64	59	57	43
p90	106	100	109	107	96	88
p95						
Incremento de PAD desde el reposo al máximo estrés (mmHg)						
Media ± DS	22 ± 14	20 ± 14	19 ± 11	19 ± 15	19 ± 13	19 ± 13
Mediana	20	16	17	16	18	16
p5	5	4	4	5	4	3
p25	12	11	11	10	11	10
p90	43	41	34	35	32	36
p95	50	49	40	43	37	43

Valores expresados como media ± desvío estándar, mediana y percentiles 5, 25, 90 y 95. PAS/PAD: presión arterial sistólica y diastólica.

principales determinantes de la magnitud de la respuesta presora. Este hallazgo concuerda con lo reportado previamente por Hedman y cols., donde la respuesta presora al esfuerzo también se explicó fundamentalmente por la edad y la presión basal, con un efecto atenuador de la capacidad de trabajo. El coeficiente de determinación de nuestros modelos ($R2 \approx 0,6$) indica una adecuada capacidad ex-

Tabla 2 C. Valores de referencia de la pendiente presión arterial / carga de ejercicio según grupo etario en hombres.

Grupo de edad (años)	< 30	30 - 39	40 - 49	50 - 59	60 - 69	70 - 85
n	100	84	187	176	155	95
Δ PAS / carga (máx estrés - etapa 1) (mmHg/Watt)						
Media ± DS	0,44 ± 0,19	0,44 ± 0,16	0,52 ± 0,19	0,53 ± 0,18	0,62 ± 0,26	0,69 ± 0,41
Mediana	0,42	0,42	0,50	0,51	0,60	0,62
p5	0,20	0,21	0,27	0,28	0,21	0,24
p25	0,33	0,33	0,38	0,41	0,46	0,49
p90	0,62	0,66	0,76	0,75	0,60	1,02
p95	0,67	0,74	0,83	0,81	0,74	1,19
Δ PAD / carga (máx estrés - etapa 1) (mmHg/Watt)						
Media ± DS	0,12 ± 0,09	0,11 ± 0,08	0,11 ± 0,09	0,12 ± 0,09	0,16 ± 0,12	0,22 ± 0,23
Mediana	0,10	0,09	0,09	0,10	0,12	0,16
p5	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02
p25	0,06	0,06	0,05	0,06	0,07	0,08
p90	0,22	0,20	0,21	0,22	0,28	0,43
p95	0,30	0,28	0,26	0,26	0,39	0,54

Valores expresados como media ± desvío estándar (DS), mediana y percentiles 5, 25, 90 y 95. PAS/PAD: Presión arterial sistólica y diastólica
Δ PAS / carga y Δ PAD / carga: corresponden a la pendiente entre el incremento máximo de presión arterial (PAS máx - PAS etapa 1 y PAD máx - PAD etapa 1) sobre el incremento máximo de carga medidia en Watts (carga en máximo estrés - carga etapa 1).

Tabla 3A. Valores de referencia de presión arterial máxima durante el ejercicio según grupo etario en mujeres.

Grupo de edad (años)	< 30	30 - 39	40 - 49	50 - 59	60 - 69	70 - 85
N	29	51	165	257	182	101
PAS máxima durante el esfuerzo (mmHg)						
Media ± DS	165 ± 24	164 ± 20	167 ± 23	173 ± 24	177 ± 25	174 ± 19
Mediana	171	162	166,5	173	177	175
p5	127	132	134	132	140	145
p25	151	152	149	157	160	161
p90	193	186	198	204	207	197
p95	202	197	209	211	218	203
PAD máxima durante el esfuerzo (mmHg)						
Media ± DS	82 ± 13	85 ± 15	88 ± 12	92 ± 14	92 ± 14	92 ± 14
Mediana	81	83	88	90	91	93
p5	66	68	69	73	72	71
p25	71	77	82	82	84	84
p90	98	98	103	108	106	110
p95	100	112	106	116	112	115
FC (cpm)	172 ± 8	165 ± 11	155 ± 16	150 ± 10	142 ± 13	130 ± 15
PAS × FC	28348 ± 4100	27047 ± 4099	25882 ± 4643	25852 ± 3866	25139 ± 4636	22623 ± 3960

Valores expresados como media ± desvío estándar (DS), mediana y percentiles 5, 25, 90 y 95. PAS/PAD: Presión arterial sistólica y diastólica. FC: frecuencia cardíaca.

plicativa, comparable con la descrita para la pendiente PAS/carga o la relación pico PAS/carga en la literatura internacional.

La edad se comportó como un determinante mayor de la respuesta tensional, con un efecto más pronunciado en mujeres. Para una misma carga de trabajo, las mujeres (especialmente en edades avanzadas) presentan un incremento despropor-

Tabla 3 B. Valores de referencia del incremento de la presión arterial con el ejercicio según grupo etario en mujeres.

Grupo de edad (años)	< 30	30 - 39	40 - 49	50 - 59	60 - 69	70 - 85
n	29	51	165	257	182	101
Incremento de PAS desde el reposo al máximo estrés (mmHg)						
Media ± DS	56 ± 22	61 ± 18	59 ± 25	62 ± 24	61 ± 25	52 ± 21
Mediana	56	62	59	62	60	53
p5	15	18	20	26	23	17
p25	41	33	42	47	45	41
p90	82	83	92	93	94	78
p95	88	88	99	101	102	87
Incremento de PAD desde el reposo al máximo estrés (mmHg)						
Media ± DS	17 ± 11	19 ± 15	19 ± 12	20 ± 14	20 ± 13	19 ± 11
Mediana	15	14	17	17	19	19
p5	1	2	4	4	5	4
p25	10	10	11	11	11	13
p90	27	40	36	39	36	30
p95	35	50	40	46	42	38

Valores expresados como media ± desvío estándar (DS), mediana y percentiles 5, 25, 90 y 95. PAS/PAD: Presión arterial sistólica y diastólica.

Tabla 3 C. Valores de referencia de la relación presión arterial / carga de ejercicio según grupo etario en mujeres.

Grupo de edad (años)	< 30	30 - 39	40 - 49	50 - 59	60 - 69	70 - 85
n	29	51	165	257	182	101
Δ PAS / carga (máx estrés - etapa 1) (mmHg/Watt)						
Media ± DS	0,55 ± 0,29	0,54 ± 0,17	0,64 ± 0,34	0,78 ± 0,40	0,90 ± 0,51	0,99 ± 0,58
Mediana	0,51	0,53	0,61	0,73	0,81	0,84
p5	0,21	0,27	0,23	0,31	0,30	0,40
p25	0,40	0,43	0,41	0,54	0,59	0,60
p90	0,79	0,77	1,02	1,14	1,51	1,80
p95	0,84	0,81	1,10	1,52	1,84	2,17
Δ PAD / carga (máx estrés - etapa 1) (mmHg/Watt)						
Media ± DS	0,17 ± 0,14	0,16 ± 0,13	0,21 ± 0,18	0,25 ± 0,24	0,32 ± 0,41	0,39 ± 0,38
Mediana	0,15	0,12	0,17	0,19	0,21	0,26
p5	0,03	0,03	0,04	0,05	0,04	0,03
p25	0,12	0,07	0,09	0,11	0,12	0,15
p90	0,26	0,33	0,39	0,49	0,62	0,81
p95	0,41	0,42	0,48	0,61	0,97	1,12

Valores expresados como media ± desvío estándar (DS), mediana y percentiles 5, 25, 90 y 95. PAS/PAD: Presión arterial sistólica y diastólica.
Δ PAS / carga y Δ PAD / carga: corresponden a la pendiente entre el incremento máximo de presión arterial (PAS máx - PAS etapa 1 y PAD máx - PAD etapa 1) sobre el incremento máximo de carga medidia en Watts (carga en máximo estrés - carga etapa 1).

cionado de la presión arterial sistólica durante el esfuerzo, lo que podría reflejar diferencias en la adaptación vascular o en la distensibilidad arterial con el envejecimiento. La correlación positiva entre la PAS basal y la pendiente PAS/carga refuerza la noción de que una mayor rigidez arterial en reposo condiciona una menor capacidad de adaptación hemodinámica durante el esfuerzo.

Por otro lado, la asociación inversa observada entre la carga máxima o la duración de la prueba y la relación PAS/carga subraya el papel modulador del entrenamiento y de la reserva cardiovascular en la respuesta hemodinámica al ejercicio. En conjunto, estos hallazgos respaldan la utilidad potencial de la relación PAS/carga para caracterizar la respuesta vascular durante el esfuerzo y plantean

su posible aplicación futura en la evaluación de alteraciones relacionadas con la rigidez arterial y la función diastólica, particularmente en mujeres de edad avanzada.

Comparación entre modalidades de ejercicio
Al comparar nuestros resultados con estudios realizados en treadmill o cicloergómetro supino, se observa que, para un nivel de esfuerzo relativo equivalente, los valores de presión arterial alcanzados en el cicloergómetro semisupino son ligeramente superiores[9,26]. Es probable que esta diferencia se relacione con la mayor presión de llenado y el incremento del volumen telediastólico característicos de la posición en semisupino, que aumentan el estrés parietal ventricular y el consumo miocárdico de oxígeno[8,9]. Tales condiciones podrían explicar la aparición de isquemia a menores cargas y una respuesta presora más acentuada en comparación con la ergometría convencional.

Hedman y cols. publicaron una de las primeras series en incorporar el análisis de la presión indexada por carga de trabajo como variable central para la interpretación de la respuesta presora al esfuerzo[21]. Al comparar nuestros resultados con dicha serie, se observan perfiles hemodinámicos similares, aunque con valores absolutos ligeramente inferiores en nuestra cohorte. Esta diferencia podría atribuirse a la menor capacidad funcional alcanzada en el cicloergómetro semisupino, donde el esfuerzo impone una mayor carga muscular en los miembros inferiores, lo que reduce la duración del ejercicio y limita la posibilidad de alcanzar cargas máximas más elevadas.

Valor clínico de la relación presión/carga
El análisis de la presión arterial en función de la carga desarrollada (mmHg/W) constituye una herramienta útil para la interpretación clínica de la respuesta presora al ejercicio. Este enfoque permite ajustar los valores de presión al nivel de esfuerzo alcanzado y evita sobreestimar respuestas elevadas en sujetos con alta capacidad funcional o subestimar incrementos desproporcionados en quienes realizan cargas bajas. Por ejemplo, una PAS de 200 mmHg puede ser fisiológica en un individuo que desarrolla 250 W, pero anómala si alcanza a 100 W.

Los valores de referencia expresados en mmHg/W facilitan así la comparación entre individuos y poblaciones, y permiten identificar respuestas presoras desproporcionadas para una carga determinada, reflejo de alteraciones en la adaptación vascular o de rigidez arterial aumentada. En este sentido, la estandarización de la presión arterial según la carga de trabajo representa un avance hacia una interpretación más precisa e individualizada de la respuesta hemodinámica al ejercicio, y constituye una base para futuros estudios de validación pronóstica y diagnóstica.

Consideraciones de la respuesta hemodinámica
Debe destacarse que tanto el gasto cardíaco como la resistencia vascular sistémica (RVS) analizados en este estudio corresponden a variables derivadas, no obtenidas mediante medición directa, las cuales fueron estimadas a partir de parámetros Doppler. En particular, la RVS se calculó como RVS = [(PAM − PADer) / GC] × 80, empleando una presión arterial media (PAM) estimada según la fórmula PAM = [(PAS − PAD) / 3] + PAD. Este enfoque implica ciertos supuestos fisiológicos, como considerar a la PAM como constante a frecuencias cardíacas elevadas, y el uso de una presión auricular derecha (PADer) estimada entre 5 y 10 mmHg. Estudios que han analizado los cambios hemodinámicos mediante pruebas cardiopulmonares invasivas con ejercicio evidencian diferencias absolutas frente a las estimaciones derivadas, aunque reproducen las tendencias globales del comportamiento hemodinámico durante el esfuerzo[29]. En consecuencia, nuestros resultados deben interpretarse como explicativos y la validación mediante métodos invasivos o resonancia magnética en ejercicio sería necesaria para confirmar la magnitud de los hallazgos.

Perspectivas futuras

Como línea de investigación futura, resulta de interés comparar estos hallazgos con grupos que presenten factores de riesgo cardiovascular o enfermedad cardiovascular establecida, así como realizar un seguimiento longitudinal de los sujetos que manifiesten una respuesta presora hipertensiva durante el ejercicio (RPH). La evidencia sugiere que estos individuos podrían beneficiarse de un control más estrecho y de intervenciones tempranas en el estilo de vida, orientadas a prevenir o retrasar el desarrollo de hipertensión arterial y sus complicaciones.

Conclusiones

Este estudio establece, por primera vez en Uruguay y en América Latina, valores de referencia de presión arterial sistólica y diastólica durante el ejercicio físico en cicloergómetro semisupino, considerando el sexo, la edad y la carga desarrollada.

Los hallazgos confirman que la respuesta presora al ejercicio depende simultáneamente de la edad, la presión arterial basal y la carga alcanzada, y que las diferencias entre sexos persisten a lo largo del espectro etario. La relación PAS/carga (mmHg/W) emerge como un parámetro robusto y clínicamente útil para interpretar la adaptación cardiovascular al esfuerzo y detectar respuestas presoras desproporcionadas.

Desde el punto de vista práctico, la incorporación de esta variable a la interpretación de las pruebas de esfuerzo con imagen puede mejorar la precisión diagnóstica y contribuir a una estratificación de riesgo más individualizada. Una respuesta presora excesiva frente a cargas bajas o durante las etapas iniciales del ejercicio debe considerarse un hallazgo de relevancia clínica y motivo de seguimiento estrecho.

En síntesis, este trabajo sienta las bases para la creación de valores de referencia regionales y promueve una evaluación más fisiológica, integrada y personalizada de la respuesta cardiovascular al ejercicio, con potencial impacto en la detección temprana de hipertensión y enfermedad cardiovascular subclínica.

Limitaciones

Reconocemos como una limitación que se trata de un estudio unicéntrico y que, si bien incluye pacientes de todo el país, tanto del sistema público como privado, estos provienen principalmente del sistema de atención mutual privado.

Agradecimientos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento al Ing. Andrés Gonzalo Farro por su valiosa colaboración en el diseño e implementación de los procesos de automatización de la base de datos utilizada para el estudio.

Ignacio Farro Ventura, ORCID: 0000-0003-1313-0587.
Fabián Martínez, ORCID: 0000-0002-9496-4737.
Carlos Américo, ORCID: 0000-0003-0517-1354.
Matías Blanco, ORCID: 0009-0005-4552-4718.
Bruno Tonelli, ORCID: 0009-0007-1850-7650.
Pablo Fontes, ORCID: 0000-0001-7896-4211.
Nohelia Rosado, ORCID: 0009-0006-9341-8976.
Gabriel Parma, ORCID: 0000-0001-6358-3723.
Natalia Lluberas, ORCID: 0000-0003-1400-0784.
Julia Aramburu, ORCID: 0000-0003-1221-595X.

Editora responsable: Dra. Jessica Olivera.

Bibliografía

1. Pellikka P, Arruda-Olson A, Chaudhry F, Chen M, Marshall J, Porter T, et al. Guidelines for Performance, Interpretation, and Application of Stress Echocardiography in Ischemic Heart Disease: From the American Society of Echocardiography. J Am Soc Echocardiogr 2020; 33(1):1-41.e8. doi: 10.1016/j.echo.2019.07.001.

2. Lancellotti P, Pellikka P, Budts W, Chaudhry F, Donal E, Dulgheru R, et al. The clinical use of stress echocardiography in non-ischaemic heart disease: recommendations from the European Association of Cardiovascular Imaging and the American Society of Echocardiography. Eur Heart J Cardiovasc Imaging 2016; 17(11):1191-229. doi: 10.1093/ehjci/jew190.

3. Vrints C, Andreotti F, Koskinas K, Rossello X, Adamo M, Ainslie J, et al; ESC Scientific Document Group. 2024 ESC Guidelines for the management of chronic coronary syndromes. Eur Heart J 2024; 45(36):3415-537. doi: 10.1093/eurheartj/ehae177.

4. Wierzbowska-Drabik K, Picano E, Cortigiani L, Kasprzak J. Comparison of coronary flow reserve feasibility in different stress echocardiography protocols: dobutamine, dipyridamole, exercise, and rapid pacing. Pol Arch Intern Med 2021; 131(9):830-9. doi: 10.20452/pamw.16035.

5. Picano E, ed. Stress Echocardiography. Berlin: Springer, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-76466-3.

6. Lancellotti P, Dulgheru R, Go Y, Sugimoto T, Marchetta S, Oury C, et al. Stress echocardiography in patients with native valvular heart disease. Heart 2018; 104(10):807-13. doi: 10.1136/heartjnl-2017-311682.

7. Thadani U, West R, Mathew T, Parker J. Hemodynamics at rest and during supine and sitting bicycle exercise in patients with coronary artery disease. Am J Cardiol 1977; 39(6):776-83. doi: 10.1016/s0002-9149(77)80026-x.

8. Poliner L, Dehmer G, Lewis S, Parkey R, Blomqvist C, Willerson J. Left ventricular performance in normal subjects: a comparison of the responses to exercise in the upright and supine positions. Circulation 1980; 62(3):528-34. doi: 10.1161/01.cir.62.3.528.

9. Wehrle A, Waibel S, Gollhofer A, Roecker K. Power output and efficiency during supine, recumbent, and upright cycle ergometry. Front Sports Act Living 2021; 3:667564. doi: 10.3389/fspor.2021.667564.

10. Dlin R, Hanne N, Silverberg D, Bar-Or O. Follow-up of normotensive men with exaggerated blood pressure response to exercise. Am Heart J 1983; 106(2):316-20. doi: 10.1016/0002-8703(83)90198-9.

11. Matthews C, Pate R, Jackson K, Ward D, Macera C, Kohl H, et al. Exaggerated blood pressure response to dynamic exercise and risk of future hypertension. J Clin Epidemiol 1998; 51(1):29-35. doi: 10.1016/s0895-4356(97)00223-0.

12. Singh J, Larson M, Manolio T, O'Donnell C, Lauer M, Evans J, et al. Blood pressure response during treadmill testing as a risk factor for new-onset hypertension. The Framingham heart study. Circulation 1999; 99(14):1831-6. doi: 10.1161/01.cir.99.14.1831.

13. Ha J, Juracan E, Mahoney D, Oh J, Shub C, Seward J, et al. Hypertensive response to exercise: a potential cause for new wall motion abnormality in the absence of coronary artery disease. J Am Coll Cardiol 2002; 39(2):323-7. doi: 10.1016/s0735-1097(01)01743-0.

14. Shin J, Shiota T, Kim Y, Kwan J, Qin J, Eto Y, et al. False-positive exercise echocardiograms: impact of sex and blood pressure response. Am Heart J 2003; 146(5):914-9. doi: 10.1016/S0002-8703(03)00410-1.

15. Labovitz A. The "myth" of the false positive stress echo. J Am Soc Echocardiogr 2010; 23(2):215-6. doi: 10.1016/j.echo.2009.12.018.

16. Rachwan R, Mshelbwala F, Dardari Z, Batal O. Fal-

se-positive stress echocardiograms: Predictors and prognostic relevance. Int J Cardiol 2019; 296:157-63. doi: 10.1016/j.ijcard.2019.08.037.

17. Schultz M, Sharman J. Exercise hypertension. Pulse (Basel) 2014; 1(3-4):161-76. doi: 10.1159/000360975.

18. Becker M, Barbosa e Silva O, Moreira I, Victor E. Arterial blood pressure in adolescents during exercise stress testing. Arq Bras Cardiol 2007; 88(3):329-33. doi: 10.1590/s0066-782x2007000300012.

19. Daida H, Allison T, Squires R, Miller T, Gau G. Peak exercise blood pressure stratified by age and gender in apparently healthy subjects. Mayo Clin Proc 1996; 71(5):445-52. doi: 10.4065/71.5.445.

20. Fletcher G, Ades P, Kligfield P, Arena R, Balady G, Bittner V, et al; American Heart Association Exercise, Cardiac Rehabilitation, and Prevention Committee of the Council on Clinical Cardiology, Council on Nutrition, Physical Activity and Metabolism, Council on Cardiovascular and Stroke Nursing, and Council on Epidemiology and Prevention. Exercise standards for testing and training: a scientific statement from the American Heart Association. Circulation 2013; 128(8):873-934. doi: 10.1161/CIR.0b013e31829b5b44.

21. Hedman K, Lindow T, Elmberg V, Brudin L, Ekström M. Age- and gender-specific upper limits and reference equations for workload-indexed systolic blood pressure response during bicycle ergometry. Eur J Prev Cardiol 2021; 28(12):1360-9. doi: 10.1177/2047487320909667.

22. Mitchell C, Rahko P, Blauwet L, Canaday B, Finstuen J, Foster M, et al. Guidelines for performing a comprehensive transthoracic echocardiographic examination in adults: recommendations from the American Society of Echocardiography. J Am Soc Echocardiogr 2019; 32(1):1-64. doi: 10.1016/j.echo.2018.06.004.

23. Oxborough D, George K, Cooper R, et al. Echocardiography in the cardiac assessment of young athletes: a 2025 guideline from the British Society of Echocardiography (endorsed by Cardiac Risk in the Young). Echo Res Pract. 2025;12(1):7. Published 2025 Mar 14. doi:10.1186/s44156-025-00069-0

24. Hall J, Hall M. Guyton and Hall textbook of medical physiology. 14 ed. Philadelphia, PA: Elsevier, 2020.

25. Assaf Y, Barout A, Alhamid A, Al-Mouakeh A, Barillas-Lara M, Fortin-Gamero S, et al. Peak systolic blood pressure during the exercise test: reference values by sex and age and association with mortality. Hypertension 2021; 77(6):1906-14. doi: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.120.16570.

26. Wilson N, Meyer B. Early prediction of hypertension using exercise blood pressure. Prev Med 1981; 10(1):62-8. doi: 10.1016/0091-7435(81)90006-2.

27. Sabbahi A, Arena R, Kaminsky L, Myers J, Phillips S. Peak blood pressure responses during maximum cardiopulmonary exercise testing: reference standards from FRIEND (Fitness Registry and the Importance of Exercise: A National Database). Hypertension 2018; 71(2):229-36. doi: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.117.10116.

28. Yang D, Tao S, Shao M, Huang L, Xiao X, Zhang J, et al. Effectiveness of exercise training on arterial stiffness and blood pressure among postmenopausal women: a systematic review and meta-analysis. Syst Rev 2024; 13(1):169. doi: 10.1186/s13643-024-02589-y.

29. Berry N, Manyoo A, Oldham W, Stephens T, Goldstein R, Waxman A, et al. Protocol for exercise hemodynamic assessment: performing an invasive cardiopulmonary exercise test in clinical practice. Pulm Circ 2015; 5(4):610-8. doi: 10.1086/683815.

Disponibilidad de los datos

Los datos que respaldan los hallazgos de este estudio están disponibles previa solicitud al autor responsable del artículo. Su acceso está restringido y sujeto a acuerdos de uso que garanticen su adecuada protección. En ningún caso se otorgarán datos confidenciales de los pacientes.

Contribución de autores:

Ignacio Farro Ventura: Conceptualización, diseño del estudio, creación de la base de datos, análisis de datos, redacción del manuscrito, realización de estudios e interpretación de resultados.
Fabián Martínez: Conceptualización, diseño del estudio, análisis de datos, redacción del manuscrito, realización de estudios e interpretación de resultados.
Carlos Américo: Conceptualización, realización de estudios, interpretación de resultados y revisión crítica del manuscrito.
Matías Blanco: Realización de los estudios y adquisición de datos.
Bruno Tonelli: Realización de los estudios y adquisición de datos.
Pablo Fontes: Realización de los estudios y adquisición de datos.
Nohelia Rosado: Realización de los estudios y contribución a la base de datos.
Gabriel Parma: Revisión crítica del manuscrito.
Natalia Lluberas: Revisión crítica del manuscrito.
Julia Aramburu: Revisión crítica del manuscrito.