

LAS ECUACIONES PREDICTORAS DE FRECUENCIA CARDIACA MÁXIMA NO SUPERAN PRUEBA CLAVE DE VALIDACIÓN EXTERNA

MAXIMUM HEART RATE PREDICTION EQUATIONS FAIL KEY EXTERNAL VALIDATION TEST

Priscilla Portuguese Molina¹ y Luis Fernando Aragón Vargas^{1*}

priscillaportuguez@gmail.com; luis.aragon@ucr.ac.cr

¹Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Envío Original: 2023-04-30 Reenviado: 2023-08-29, 2023-10-26 Aceptado: 2023-10-27

Publicado: 2023-11-30

Doi: <https://doi.org/10.15517/pensarmov.v21i2.54959>

*Luis F. Aragón-Vargas es Editor en Jefe de Pensar en Movimiento. El proceso de revisión a doble ciego se hizo independientemente de él hasta tomar una decisión

RESUMEN

Las ecuaciones de frecuencia cardiaca máxima (FCmax) se han utilizado por su fácil obtención y practicidad, en comparación con las pruebas de esfuerzo. Sin embargo, la ecuación más conocida “220-edad” presenta baja fiabilidad y desviaciones de hasta 12 lat/min. Se han planteado nuevas fórmulas, pero estas no han sido correctamente validadas. El propósito de este estudio fue validar 7 ecuaciones de predicción utilizando una base de datos independiente. Se utiliza una base con datos de 634 sujetos (474 hombres y 160 mujeres) de 18-85 años, que fueron obtenidos como parte de un servicio de salud desarrollado en la Universidad de Michigan entre 1990-1992. Los sujetos realizaron una prueba de VO₂max en banda sin fin, siguiendo un protocolo libre. Se utilizó la técnica de regresión lineal, en la que las ecuaciones adecuadas fueron aquellas que cumplieron con las 2 hipótesis: pendiente=1 y constante=0. De acuerdo con los resultados, ninguna de las ecuaciones analizadas para toda la muestra aceptó ambas hipótesis. Al realizar el análisis de acuerdo con el sexo, seis de las ecuaciones cumplieron con las dos hipótesis para las mujeres, pero ninguna para los hombres; y cuando se realizó de

acuerdo con el grupo de edad, 4 de las ecuaciones cumplieron las hipótesis para el grupo de personas de 40 años o menos, pero no para el grupo de mayores de 40 años. La FCmax parece ser difícil de predecir por una única ecuación, por lo que se recomienda que cuando se necesite una medida válida de esta variable se recurra a una prueba directa.

Palabras clave: pruebas de ejercicio, pruebas de esfuerzo, salud.

ABSTRACT

Maximum heart rate (HRmax) equations have been used due to their simplicity and practicality, in comparison with stress tests. However, the best known “220-age” equation presents: low reliability and deviations of up to 12 beats/min. New formulas have been proposed, but these have not been correctly validated. The purpose of this study was to validate 7 prediction equations using an independent database. A database of 634 subjects (474 men and 160 women) aged 18-85 years, obtained as part of a health service developed at the University of Michigan between 1990-1992, was used. Subjects performed a VO₂max test on a treadmill, following a free protocol. The linear regression technique was used, in which the appropriate equations were those that met the 2 hypotheses: slope=1 and constant=0. According to the results, none of the equations analyzed for the entire sample accepted both hypotheses. When carrying out the analysis divided by sex, six of them met the two hypotheses for women, but none for men; and when performed divided by age group, 4 of the equations met the hypotheses for the group of people with 40 years or younger, but not for the group of people over 40 years. HRmax. seems to be difficult to predict using a single equation, hence it is recommended that when a valid measure of this variable is needed, a stress test should be used.

Key words: exercise tests, stress tests, health.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los años, se ha utilizado la frecuencia cardiaca (FC) como una forma de control fisiológico, que evalúa la intensidad del esfuerzo a la que se realiza el ejercicio. Esto es posible gracias a que existe una relación entre el Consumo Máximo de Oxígeno (VO₂max) y la Frecuencia Cardiaca Máxima (FCmax) (Bouzas-Marins et al., [2010](#); McArdle et al., [2010](#)).

La frecuencia cardiaca máxima es la frecuencia más alta que se obtiene durante un ejercicio progresivo, que busca realizarse a máximo esfuerzo (Mahon et al., [2010](#)). La FCmax varía entre individuos y es influenciada por una serie de factores como por ejemplo el comando

nervioso central, pero factores externos, como el tipo de ejercicio (Bouzas-Marins et al., [2013](#)) la temperatura y la altitud pueden afectarla (Povea y Cabrera, [2018](#)).

Las pruebas de esfuerzo permiten conocer qué tan adecuadamente funciona el corazón durante la actividad física y detectar trastornos cardíacos, diagnosticar la enfermedad de arterias coronarias, arritmias y divisar si se está en riesgo de sufrir un ataque u otra afección cardíaca. Para su realización, se colocan electrodos, los cuales se conectan a una máquina de electrocardiograma (ECG) que registra la actividad eléctrica del corazón durante toda la prueba. La dificultad del ejercicio se aumenta hasta alcanzar la FCmax., pero podría detenerse antes de esto si se presentaran síntomas como: dolor en el pecho, dificultad para respirar, mareos, fatiga y en caso de que el electrocardiograma refleje algún problema en el corazón (American College of Sports Medicine (ACSM), 2021; Vilcant y Zeltser, [2022](#)).

Existen dos formas en las que se puede obtener la FCmax: de manera directa, con pruebas de esfuerzo máximo, como se explicó anteriormente; o la indirecta, por medio de ecuaciones de predicción. Este último método ha destacado por su fácil obtención y la practicidad, en comparación a la realización de una prueba ergométrica (Machado y Denadai, [2011](#)).

Sin embargo, existe controversia respecto a la utilización de las ecuaciones predictoras de FCmax. La fórmula más conocida es la de “220 - edad”, pero dado que esta no fue obtenida mediante un análisis de regresión e incluso se demostró que si se realiza una regresión lineal a los datos de los cuales se consiguió, la ecuación no coincide con la línea de mejor ajuste propuesta; tanto su uso como su procedencia son dudosas (Robergs y Landwehr, [2002](#)).

La fórmula “220 - edad” se sigue utilizando para determinar si una prueba de esfuerzo es considerada o no máxima -un clásico ejemplo de lógica circular- y en algunas ocasiones en contextos deportivos y de salud, a pesar de los estudios que comprueban su baja fiabilidad y de los datos que presentan una desviación de hasta 12 lat/min, respecto a las pruebas de esfuerzo (Gellish et al., [2007](#)). Agregado a esto, se conoce que esta fórmula sobreestima los valores en personas jóvenes y la subestima en personas mayores; así como también se conoce ahora que la FCmax no disminuye un latido por año, como propone la fórmula, sino aproximadamente 0,7 latidos cada año (Povea y Cabrera, [2018](#)).

Ya se han realizado estudios que cuestionan el uso y validez de la fórmula “220-edad” para obtener la FCmax, (Aragón-Vargas et al., [1993](#); Bouzas-Marins et al., [2013](#); Bouzas-Marins y Delgado-Fernández, [2007](#); Pereira Rodríguez et al., [2017](#); Robergs y Landwehr, [2002](#)), por lo que se han desarrollado nuevas ecuaciones predictoras de la FCmax utilizando un modelo lineal con una única variable, pero también algunas que involucran múltiples variables (Londeree y

Moeschbeger, [1982](#); Whaley et al., [1992](#)). Como se sabe que la FCmax está estrechamente relacionada con la edad (a medida que la edad aumenta, la FCmax disminuye) y que la edad modula gran parte de la FCmax, a pesar de que existen otras variables relacionadas; la mayoría de las ecuaciones de predicción la incluyen como variable única (Bouzas-Marins et al., [2010](#)). Estas ecuaciones, así como alrededor de otras 50 más, se han planteado como solución frente al problema.

Ejemplo de las nuevas ecuaciones planteadas son: la ecuación de “208- 0,7 edad” desarrollada por Tanaka et al. ([2001](#)) y la de “207- 0,7 edad” por Gellish et al. ([2007](#)), que han ganado popularidad.

La ecuación de Tanaka et al. ([2001](#)), una de las más utilizadas actualmente, fue desarrollada por medio de un metaanálisis en el que se obtiene una ecuación de regresión, tomando en cuenta un total de 18712 sujetos y fue validada de forma cruzada en un estudio experimental posterior, con 514 sujetos. En un estudio realizado por Miragaya y Magri ([2016](#)) se concluye que la fórmula de Tanaka et al. ([2001](#)) es mejor para personas con edades menores a los 40, que presentaran o no un factor de riesgo cardiovascular, al compararse con la fórmula “220 - edad” y, en el estudio de Bouzas-Marins et al. ([2010](#)) se observa que fue la más adecuada para los hombres del estudio. Sin embargo, el error de esta ecuación (208- 0,7 x edad) no es reportado por los autores.

Por otro lado, la ecuación de Gellish et al. ([2007](#)) se obtiene a partir de mediciones en los sujetos a lo largo de 25 años, para un total de 908 mediciones. Posterior a las mediciones, se obtiene de igual forma, la ecuación de regresión, la cual reporta un rango de $\pm 5-8$ latidos por minuto. Esta ha sido reconocida por la utilización de métodos estadísticos más modernos y destaca por la conclusión de que la edad y la FCmax no presentan una relación lineal (Jackson, [2007](#)). A pesar de esto, los autores se inclinan por utilizar un modelo lineal para brindar una ecuación útil y más práctica (Gellish et al., [2007](#))

Y, así como estas dos, se han propuesto ecuaciones para poblaciones específicas (enfermedad coronaria, hipertensión, retardo mental, personas entrenadas) y para la población general (Fernhall et al., [2001](#); Graettinger et al., [1995](#); Nes et al., [2013](#); Ricard et al., [1990](#)). No obstante, es difícil encontrar la fuente original de muchas de ellas (por ejemplo la de Morris, citado por Pereira-Rodríguez et al., [2017](#)) y se han desarrollado pocos esfuerzos por validar estas ecuaciones en bases de datos independientes después de que son propuestas.

La validez es una propiedad de las inferencias que se realizan en un estudio. La validez externa establece en qué medida se pueden generalizar los resultados de un estudio a una población más amplia (generalizabilidad) o a otras poblaciones (transportabilidad) (Findley et al.,

[2021](#)). La validez de criterio es un método que examina cómo se relaciona el resultado obtenido de una prueba con un criterio externo, para finalmente demostrar si el valor calculado predice el resultado real (Piedmont, [2014](#)). La importancia de validar las ecuaciones reside en que la ecuación obtenida de un grupo de datos siempre será la mejor para estos mismos datos, pero no necesariamente es aplicable a datos de otras muestras (Berrar, [2018](#)).

Agregado a esto, los estudios previos orientados a descubrir la mejor ecuación para predecir la FCmax (Bouzas-Marins et al., [2010](#); Cruz-Martínez et al., [2014](#); Miragaya y Magri, [2016](#); Bouzas-Marins y Delgado-Fernández, [2007](#), entre otros), presentan características (en algunas ocasiones limitaciones) como: muestras más pequeñas, insuficientes análisis estadísticos y protocolos que no utilizan pruebas de esfuerzo para obtener la FCmax como punto de comparación.

Cuando se utiliza una prueba de esfuerzo para obtener la FCmax, se pueden seguir distintos protocolos. El protocolo en banda sin fin de Bruce y el de Bruce modificado son los más utilizados, pero se ha planteado que un enfoque más gradual podría estimar en mejor medida la capacidad de ejercicio. Otros como el de Balke, Astrand, Ellestad y Naughton podrían considerarse; tomando en cuenta que lo importante realmente es individualizar el protocolo (Myers y Bellin, [2012](#)).

Para poder considerar una prueba como máxima se deben cumplir ciertos criterios, pero estos son difíciles de determinar. Por ejemplo, actualmente el Colegio Americano de Medicina Deportiva (ACSM, por sus siglas en inglés) ha planteado criterios como: llegar a una meseta en el consumo de oxígeno con aumentos en la carga de trabajo, falta de aumento en la FC con aumentos en la carga de trabajo, concentración de lactato postejercicio mayor a $8.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, esfuerzo percibido mayor a 17 en la escala 6-20 o mayor a 7 en la escala 0-10, un coeficiente de intercambio respiratorio (RER) pico $\geq 1,10$. Sin embargo no existe consenso en el número de criterios que se deben cumplir para asegurar una prueba máxima. El RER pico se ha visto como el indicador no invasivo más preciso y objetivo, mientras que los demás criterios se han visto como dudosos en ciertas ocasiones (ACSM, [2021](#)).

Debido a las múltiples limitaciones existentes en las ecuaciones de predicción de la FCmax se vuelve importante realizar un estudio que indique si las fórmulas de predicción planteadas son válidas. El propósito de este estudio es validar las ecuaciones de predicción de la FCmax de Fernhall et al. ([2001](#)), Gellish et al. ([2007](#)), Graettinger et al. ([1995](#)), Nes et al. ([2013](#)), Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., [2017](#)), Ricard et al. ([1990](#)) y Tanaka et al. ([2001](#)) por medio de una base de datos independiente (Aragón-Vargas et al., [2022](#)).

METODOLOGÍA

Procedimientos

Los datos de los sujetos fueron obtenidos como parte de un servicio de salud desarrollado por el “Fitness Research Center” de la Universidad de Michigan entre 1990 y 1992 (Aragón-Vargas et al., [2014](#)). Las pruebas fueron realizadas a lo largo del día, según la disponibilidad de tiempo de los evaluados, en condiciones ambientales de laboratorio de acuerdo con las normas recomendadas por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, por sus siglas en inglés), a saber: entre 20-24,5° Celsius y una humedad relativa entre 20% y 60%. Un fisiólogo del ejercicio clínico, certificado, realizó la supervisión durante las pruebas. Se excluyó a aquellas personas que presentaran un diagnóstico de enfermedades cardíacas y a las que tuvieran que detener la prueba por razones de seguridad, sin haber alcanzado los criterios establecidos para considerarse una prueba máxima.

Previo a las mediciones, los sujetos llenaron un formulario de información: edad, sexo, uso de tabaco y nivel habitual de actividad física. Luego, se les realizó una evaluación pulmonar, se tomaron las medidas antropométricas y se efectuó un pesaje hidrostático.

La Capacidad Aeróbica Máxima se obtuvo mediante una prueba de Consumo Máximo de oxígeno realizado en banda sin fin, siguiendo un protocolo libre que realizaba aumentos progresivos de velocidad e inclinación. Durante la prueba, se monitoreó el RER (cociente respiratorio o relación de intercambio respiratorio), tasa de ventilación, consumo de oxígeno y frecuencia cardíaca. Los sujetos inhalaban aire del ambiente y espiraban los gases, que fueron analizados en una unidad de gasto energético Sensormedics 2009.

La prueba se detuvo cuando el sujeto no podía continuar y fue considerada como una prueba de esfuerzo máximo si cumplía con al menos 2 de los siguientes criterios: 1-RER>1,20 2- FCmax igual o mayor a la FCmax predicha por la ecuación $220 - \text{edad}$, menos 10 lat/min 3-Incremento considerable de la tasa de ventilación.

Criterios convencionales se utilizaron para terminar la prueba de manera anticipada en caso de anomalías en el electrocardiograma. La Frecuencia Cardíaca Máxima se definió como la frecuencia sinusal o auricular más alta (promedio de dos series de tres latidos consecutivos) obtenidos de forma manual del electrocardiograma durante el último minuto de la prueba con una regla de ECG de Cardizem. Esta fue la frecuencia cardíaca medida o real.

Para obtener los valores predichos por la ecuación de Aragón et al. ([1993](#)) (CalAragón), se tomó la base de datos original, con los valores de FCmax reales y las edades reportadas por cada uno de los sujetos y se aplicó la ecuación “ $218,78 - 0,79 \text{ edad}$ ”. Asimismo, para obtener los valores para las demás ecuaciones se realizó el mismo procedimiento para cada una y se nombró

la variable como CalApellidoDelPrimerAutor. Las ecuaciones utilizadas fueron: Fernhall et al. (2001), Gellish et al. (2007), Graettinger et al. (1995), Nes et al. (2013), Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., 2017), Ricard et al. (1990) y Tanaka et al. (2001). Cada ecuación se presenta claramente en la [Tabla 2](#). Además, se agregó la ecuación de Fox y Naughton (1972) “220-edad” con el objetivo solamente de mostrar sus datos, a pesar de que ya se han realizado estudios previos que la cuestionan.

Sujetos

La muestra estuvo conformada por 634 sujetos, a saber, 474 hombres y 160 mujeres de edades entre los 18 a los 85 años cumplidos, con diferentes niveles habituales de actividad física.

Análisis estadístico

Se utilizó el paquete estadístico JMP Pro-15. Para la estadística descriptiva se calculó la media, desviación estándar, el mínimo y el máximo. Para la estadística inferencial se realizaron los siguientes análisis:

Con el fin de comparar los valores de la FCmax calculada mediante una fórmula específica y la FCmax obtenida mediante la medición, se utilizó una regresión lineal dada por $\mu_{Y|X} = \alpha + \beta X$, donde Y = FC obtenida mediante medición y X = FC calculada según las ecuaciones, en la cual se establecen las siguientes hipótesis: $\alpha=0$ y $\beta=1$. Una ecuación se consideró satisfactoria si cumplía ambas hipótesis, para que se cumpla que X=Y. Para las pruebas de hipótesis se estableció un nivel de significancia de 0,05.

Además, se calculó el R-cuadrado (R^2), el cual define qué tan cerca están los datos de la línea de regresión e indica cuál es el porcentaje de variación de una variable explicado por el modelo lineal o, en qué porcentaje los cambios en Y son explicados por un cambio X.

Las ecuaciones candidatas a tener una buena predicción serían aquellas en las cuales ninguna de las dos hipótesis se rechace.

Después de realizar los análisis para las ecuaciones utilizando la muestra completa, se realizó el mismo procedimiento, pero separando la muestra por sexo (hombres y mujeres), utilizando la misma ecuación descrita por los autores para ambos subgrupos; y posteriormente separando la muestra por grupos de edad (menores o iguales a 40 años y mayores a 40 años), usando de igual manera la misma ecuación para los dos subgrupos.

Se evaluaron los supuestos de normalidad y heterocedasticidad por medio de un gráfico de residuos contra valores predichos.

RESULTADOS

Las características de los sujetos: edad, altura, masa, VO₂max, capacidad vital, FCmax real y FCmax obtenida por medio de las diferentes ecuaciones se describen en la [tabla 1](#). (Portuguez Molina y Aragón Vargas, [2023](#)).

Tabla 1.

Características de los sujetos de la base de datos independiente (n=634).

| Variable | Media | Desviación estándar | Mínimo | Máximo |
|---|--------------|----------------------------|---------------|---------------|
| Edad (años) | 44,09 | 11,82 | 18 | 85 |
| Altura (cm) | 175,17 | 8,71 | 150,6 | 196,8 |
| Masa (kg) | 78,89 | 15,28 | 41,2 | 141,6 |
| VO ₂ max (ml/kg/min) | 37,81 | 9,34 | 15,29 | 72,37 |
| Capacidad vital (L) | 4,26 | 0,91 | 2 | 7,02 |
| FCmax real (lat/min) | 183,79 | 14,00 | 108 | 225 |
| FCmax = 218,78-0,79 edad Aragón et al. (1993) (lat/min) | 183,95 | 9,34 | 151,63 | 204,56 |
| FCmax = 220-edad Fox y Naughton (1972) (lat/min) | 175,94 | 11,81 | 135 | 202 |
| FCmax = 205-0,64 edad Fernhall et al. (2001) (lat/min) | 176,78 | 7,56 | 150,6 | 193,48 |
| FCmax = 207-0,7 edad Gellish et al. (2007) (lat/min) | 176,14 | 8,27 | 147,5 | 194,4 |
| FCmax = 199-0,63 edad Graettinger et al. (1995) (lat/min) | 171,22 | 7,45 | 145,45 | 187,66 |
| FCmax = 200-0,72 edad Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., 2017) (lat/min) | 168,26 | 8,51 | 138,8 | 187,04 |
| FCmax = 211-0,64 edad Nes et al. (2013) (lat/min) | 182,78 | 7,56 | 156,6 | 199,48 |
| FCmax =209-0,587 edad Ricard et al. (1990) (lat/min) | 183,12 | 6,94 | 159,11 | 198,43 |
| FCmax = 208-0,7 edad Tanaka et al. (2001) (lat/min) | 177,14 | 8,27 | 148,5 | 195,4 |

Fuente: elaboración propia.

La [Figura 1](#) presenta los datos para edad y frecuencia cardiaca máxima para cada uno de los sujetos.

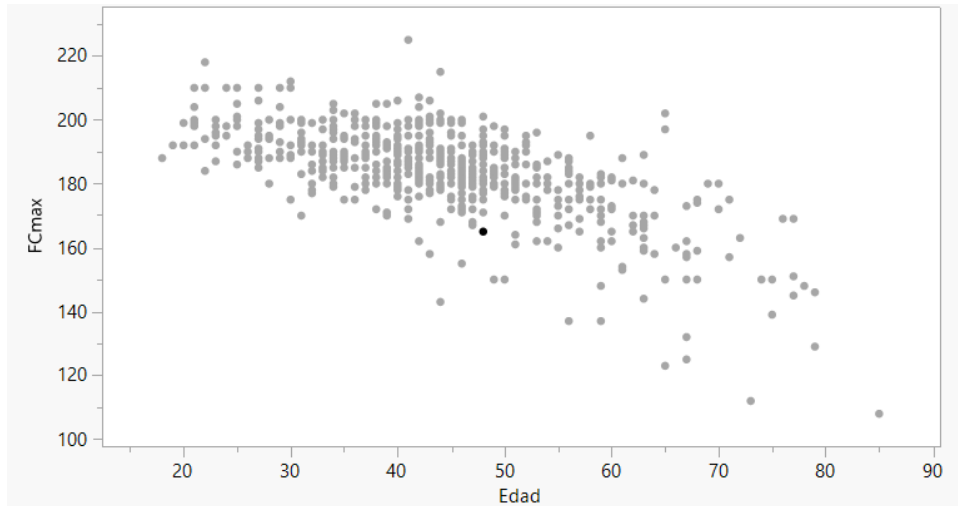


Figura 1. Comparación de la FCmax con la edad para cada sujeto. Fuente: elaboración propia.

La [tabla 2](#) presenta los valores de la constante y la pendiente, así como el valor de significancia para cada ecuación. La ecuación de Aragón et al. ([1993](#)) es la única que cumple las hipótesis de que la pendiente=1 y la constante=0 y (esto se puede observar de manera gráfica en la [Figura 2](#)). Para las ecuaciones de Tanaka et al. ([2001](#)), Gellish et al. ([2007](#)) y Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., [2017](#)), los resultados indican que no existe diferencia estadísticamente significativa entre la constante obtenida y 0, pero sí existe diferencia estadísticamente significativa entre la pendiente y 1 (lo que se puede observar en las [Figura 3](#)). Por otro lado, en los resultados de las ecuaciones de Nes et al. ([2013](#)), Fernhall et al. ([2001](#)), Ricard et al. ([1990](#)) y Graettinger et al. ([1995](#)) se puede observar que el valor de la constante es diferente de 0 y la pendiente diferente a 1, por lo que no cumplen ninguna de las dos hipótesis ([Figura 3](#))

El valor de R-cuadrado para todas las ecuaciones fue de 0,45.

Tabla 2.

Valores obtenidos para la ecuación y sus significancias.

| Ecuación | Autores | Constante | Prob > t | Pendiente | Prob > t |
|------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 218,78-0,79 edad | Aragón-Vargas et al. (1993) | -0,98 | 0,90 | 1,00 | 0,92 |
| 220-edad | Fox y Naughton (1972) | 44,20 | <0,0001* | 0,79 | <0,0001* |
| 205-0,64 edad | Fernhall et al. (2001) | -35,40 | 0,0003* | 1,24 | <0,0001* |
| 207-0,7 edad | Gellish et al. (2007) | -15,88 | 0,07 | 1,13 | 0,008* |
| 199-0,63 edad | Graettinger et al. (1995) | -31,87 | 0,0009* | 1,26 | <0,0001* |
| 200-0,72 edad | Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., 2017) | -1,64 | 0,84 | 1,10 | 0,04* |
| 211-0,64 edad | Nes et al. (2013) | -42,84 | <0,0001* | 1,24 | <0,0001* |
| 209-0,587 edad | Ricard et al. (1990) | -63,76 | <0.0001* | 1,35 | <0,0001* |
| 208-0,7 edad | Tanaka et al. (2001) | -17,01 | 0,06 | 1,13 | 0,008* |

Nota: * = diferencia significativa. En amarillo se resaltan los resultados que no presentan diferencias significativas (a saber, que cumplen las hipótesis $\alpha=0$ y $\beta=1$). Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que las figuras 2 y 3 muestran 2 líneas: la línea de mejor ajuste que arroja cada ecuación (rojo) y la línea de identidad (verde), que sería la línea cuando la pendiente=1 y la constante=0.

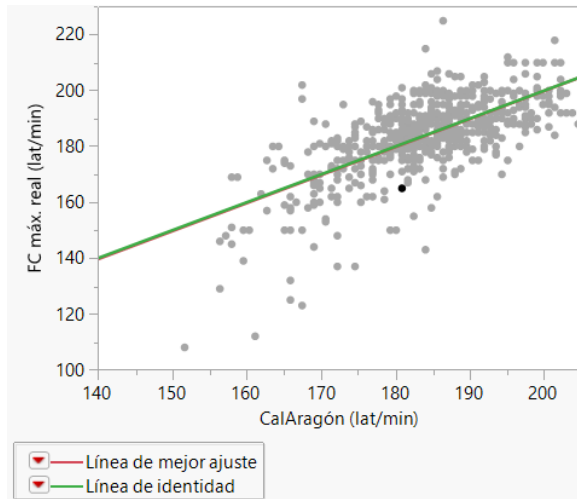


Figura 2. Línea de mejor ajuste para CalAragón. Nota: pendiente=1, constante=0. $R^2=0,45$. Por definición, esta línea se superpone a la línea de mejor ajuste. Fuente: elaboración propia.

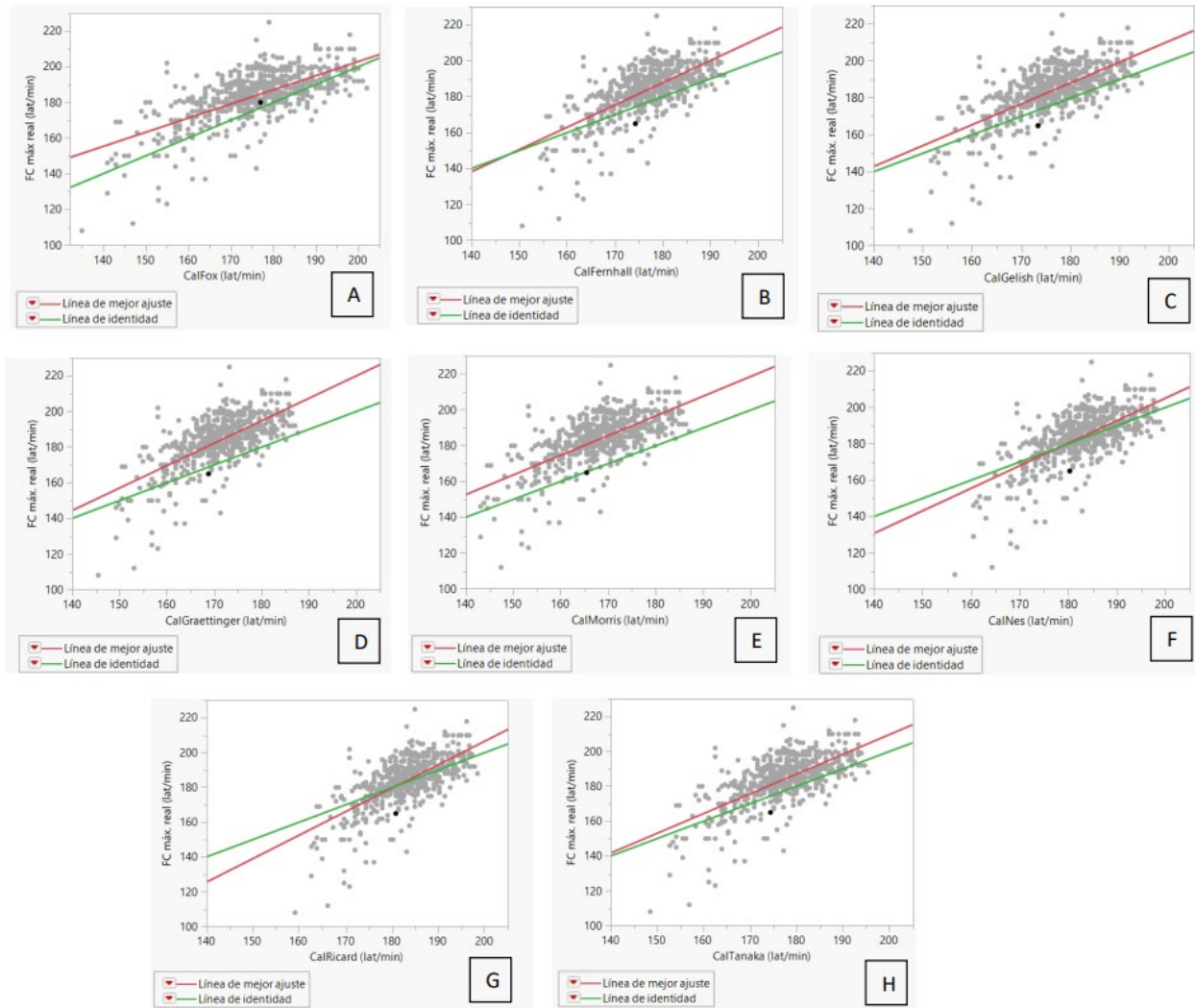


Figura 3. Línea de mejor ajuste para Cal220-edad (A), CalFernhall (B), CalGellish (C) CalGraettinger (D), CalMorris (E), CalNes (F), CalRicard (G), CalTanaka (H). Nota: $R^2=0,45$. Fuente: elaboración propia.

División por sexo

Al analizar los datos para cada una de las ecuaciones, dividiendo el grupo en hombres y mujeres, la [Tabla 3](#) muestra que todas las ecuaciones, exceptuando la de Aragón et al. (1993) y la de Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., 2017), cumplen ambas hipótesis (constante=0, pendiente=1) para el grupo de mujeres. Sin embargo, la ecuación de Morris cumple la hipótesis de la pendiente, pero no la de la constante. Para el grupo de hombres, ninguna de las ecuaciones cumplió las hipótesis.

Con respecto al valor de R^2 para los hombres, el valor fue de 0,46 y para las mujeres de 0,44.

Tabla 3.

Valores obtenidos para la ecuación y sus significancias por sexo.

| Ecuación | Autores | Constante | Prob > t | Pendiente | Prob > t |
|------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 218,78-0,79 edad | Aragón-Vargas et al. (1993)-Hombres | -21,07 | 0,04* | 1,12 | 0,04* |
| 218,78-0,79 edad | Aragón-Vargas et al. (1993)-Mujeres | 37,49 | 0,005* | 0,79 | 0,003* |
| 220-edad | Fox y Naughton (1972) -Hombres | 29,13 | 0,0002* | 0,88 | 0,007* |
| 220-edad | Fox y Naughton (1972) -Mujeres | 73,055751 | <0,0001* | 0,62 | <0,0001* |
| 205-0,64 edad | Fernhall et al. (2001) - Hombres | -59,32 | <0,0001* | 1,38 | <0,0001* |
| 205-0,64 edad | Fernhall et al. (2001) - Mujeres | 10,40 | 0,50 | 0,98 | 0,78 |
| 207-0,7 edad | Gellish et al. (2007) - Hombres | -37,63 | 0,0006* | 1,26 | <0,0001* |
| 207-0,7 edad | Gellish et al. (2007) - Mujeres | 25,77 | 0,07 | 0,89 | 0,18 |
| 199-0,63 edad | Graettinger et al. (1995) - Hombres | -55,40 | <0,0001* | 1,40 | <0,0001* |
| 199-0,63 edad | Graettinger et al. (1995) - Mujeres | 13,17 | 0,39 | 0,99 | 0,92 |
| 200-0,72 edad | Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., 2017) – Hombres | -21,81 | 0,03* | 1,22 | 0,0002* |
| 200-0,72 edad | Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., 2017) - Mujeres | 36,97 | 0,005* | 0,87 | 0,09 |
| 211-0,64 edad | Nes et al. (2013) - Hombres | -67,59 | <0,0001* | 1,38 | <0,0001* |
| 211-0,64 edad | Nes et al. (2013) - Mujeres | 4,55 | 0,78 | 0,98 | 0,78 |
| 209-0,587 edad | Ricard et al. (1990) - Hombres | -90,84 | <0,0001* | 1,50 | <0,0001* |
| 209-0,587 edad | Ricard et al. (1990) - Mujeres | -11,92 | 0,49 | 1,06 | 0,50 |
| 208-0,7 edad | Tanaka et al. (2001) - Hombres | -38,89 | 0,0004* | 1,26 | <0,0001* |
| 208-0,7 edad | Tanaka et al. (2001) - Mujeres | 24,89 | 0,08 | 0,89 | 0,18 |

Nota: * = diferencia significativa. n hombres = 474 y n mujeres= 160. En amarillo se resaltan los resultados que no presentan diferencias significativas, a saber, que sí cumplen las hipótesis $\alpha=0$ y $\beta=1$. Fuente: elaboración propia.

Cuando se realiza el análisis dividiendo al grupo inicial (tanto hombres como mujeres) en 2 categorías de acuerdo con su edad (mayores de 40 años y menores o iguales a 40 años), se obtuvo lo siguiente: Las ecuaciones de Nes et al. (2013), Fernhall et al. (2001), Ricard et al., (1990) y Graettinger et al. (1995) cumplen las dos hipótesis para el grupo de menores o iguales a 40 años, pero no para el grupo de más de 40 años. La de Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., 2017), cumple la hipótesis de que pendiente=1, pero no la otra. El resto de las ecuaciones no cumplen las hipótesis para ninguno de los dos grupos. Estos valores se presentan en la [tabla 4](#).

Para el grupo de mayores de 40 años el R^2 fue de 0,40, mientras que el del grupo de menores o iguales a 40 años fue de 0,14.

Tabla 4.

Valores obtenidos para la ecuación y sus significancias por grupo de edad

| Ecuación | Autores | Constante | Prob > t | Pendiente | Prob > t |
|------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 218,78-0,79 edad | Aragón-Vargas et al. (1993)- Menor o igual a 40 | 62,53 | 0,004* | 0,67 | 0,003* |
| 218,78-0,79 edad | Aragón-Vargas et al. (1993)- Mayor a 40 | -60,95 | <0,0001* | 1,34 | <0,0001* |
| 220-edad | Fox y Naughton (1972) - Menor o igual a 40 | 92,60 | <0,0001* | 0,5281146 | <0,0001* |
| 220-edad | Fox y Naughton (1972) - Mayor a 40 | -0,46 | 0,97 | 1,06 | 0,34 |
| 205-0,64 edad | Fernhall et al. (2001) - Menor o igual a 40 | 39,62 | 0,11 | 0,82 | 0,20 |
| 205-0,64 edad | Fernhall et al. (2001) - Mayor a 40 | -107,04 | <0,0001* | 1,66 | <0,0001* |
| 207-0,7 edad | Gellish et al. (2007) - Menor o igual a 40 | 52,62 | 0,02* | 0,75 | 0,049* |
| 207-0,7 edad | Gellish et al. (2007) - Mayor a 40 | -80,90 | <0,0001* | 1,52 | <0,0001* |
| 199-0,63 edad | Graettinger et al. (1995)/ Menor o igual a 40 | 41,97 | 0,09 | 0,84 | 0,24 |
| 199-0,63 edad | Graettinger et al. (1995) - Mayor a 40 | -102,32 | <0,0001* | 1,69 | <0,0001* |
| 200-0,72 edad | Morris (citada por Pereira- Rodríguez et al., 2017) – Menor o igual a 40 | 62,09 | 0,004* | 0,73 | 0,03 |
| 200-0,72 edad | Morris (citada por Pereira- Rodríguez et al., 2017) - Mayor a 40 | -61,85 | <0,0001* | 1,48 | <0,0001* |
| 211-0,64 edad | Nes et al. (2013) - Menor o igual a 40 | 34,67 | 0,18 | 0,83 | 0,20 |

| | | | | | |
|----------------|---|----------|----------|------|----------|
| 211-0,64 edad | Nes et al. (2013) - Mayor a 40 | -117, 00 | <0,0001* | 1,66 | <0,0001* |
| 209-0,587 edad | Ricard et al. (1990) - Menor o igual a 40 | 20,77 | 0,46 | 0,90 | 0,50 |
| 209-0,587 edad | Ricard et al. (1990) - Mayor a 40 | -145,00 | <0,0001* | 1,81 | <0,0001* |
| 208-0,7 edad | Tanaka et al. (2001) - Menor o igual a 40 | 51,86 | 0,02* | 0,75 | 0,049* |
| 208-0,7 edad | Tanaka et al. (2001) - Mayor a 40 | -82,42 | <0,0001* | 1,52 | <0,0001* |

Nota: * = diferencia significativa. n menores o iguales a 40 años =170 y n mayores a 40 años =464. En amarillo se resaltan los resultados que no presentan diferencias significativas, a saber, que sí cumplen las hipótesis $\alpha=0$ y $\beta=1$. Fuente: elaboración propia.

DISCUSIÓN

El presente estudio utiliza una base de datos independiente para validar ecuaciones de predicción de la frecuencia cardiaca máxima (FCmax) que han realizado diferentes autores. Para esto, se utilizan la regresión lineal para probar las siguientes hipótesis:

- 1- La pendiente debe ser igual a 1.
- 2- La constante debe ser igual a 0.

Al evaluar las ecuaciones con las hipótesis planteadas, se pudo observar que la ecuación de Aragón et al. ([1993](#)) es la única que puede aceptar que la pendiente es 1 y que la constante es 0. Este resultado va acorde con lo esperado, ya que la ecuación de estos autores surge a partir de los datos que se están analizando y, como se ha mencionado anteriormente, la importancia que tiene el validar una ecuación reside en que el modelo que se realice, precisamente se va a adaptar a la base de datos usada. Es decir, esta ecuación es el mejor modelo para este grupo de datos, pero no necesariamente va a poder tener la misma predicción con otros (Berrar, [2018](#)).

Por otro lado, las ecuaciones de Tanaka et al. ([2001](#)), Gellish et al. ([2007](#)) y Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., [2017](#)) aceptan la hipótesis de que la constante = 0, pero rechazan que la pendiente = 1.

La pendiente es la variable más importante al hacer ecuaciones de regresión de este tipo porque es la que indica cómo se relacionan X y Y (Ruppert, [2014](#)). El valor de la pendiente describe la consistencia de los datos. Es decir, cuando esta hipótesis se cumple, los valores reales y los valores calculados varían juntos consistentemente en sus rangos (Smith y Rose, [1995](#)) y cuando es diferente a 1, la brecha entre las curvas simuladas y las observadas será proporcional a los valores de los puntos (Mesplé et al., [1996](#)).

En lo que respecta a la constante, aunque esta variable no tiene que ver con la asociación entre la variable X y la Y (LeBlanc, [2004](#)), sí puede realizar transformaciones que centren o desvíen los datos. Entonces, a pesar de que no se cambian los valores calculados, se cambia el punto de origen y, debido a esto, aunque la predicción no ha cambiado (tiene la misma línea), cambia la posición del punto 0 en el eje horizontal (Judd et al., [2017](#)).

No obstante, se ha planteado que la prueba constante=0 sólo es realmente útil cuando la pendiente no es diferente de 1 (Smith y Rose, [1995](#)). La constante puede dar información acerca del sesgo del modelo, pero no tiene sentido si se toma literalmente: el valor de Y cuando X es 0, esencialmente porque en ciertas variables no existen valores de X=0, como lo es el caso de la FCmax. En este sentido, la utilidad de la constante se limita a asegurar matemáticamente que

una predicción es correcta; es un valor que debe agregarse siempre al componente de la pendiente para que se prediga adecuadamente (Lewis-Beck y Lewis-Beck, [2015](#)).

Lo que se observa entonces en las ecuaciones de Tanaka et al. ([2001](#)), Gellish et al. ([2007](#)) y Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., [2017](#)) es que, como la constante es 0 y la pendiente >1 , los valores calculados van a subestimar los medidos y por ende, no son válidas.

Las ecuaciones restantes no cumplen con ninguna de las hipótesis por lo que, si sus pendientes son diferentes a 1 y sus constantes diferentes a 0, no son adecuadas para predecir los valores reales y tienen distintas posibilidades (sobrestimación, subestimación o ambas, en diferentes puntos de la línea).

En lo que respecta al valor de R^2 , este tuvo un valor de 0,45 para todas las ecuaciones. El coeficiente de determinación indica cuál es la proporción de la varianza total que se puede explicar por el modelo de la regresión, es decir cuánta de la variación en los valores reales se explica por la variación en los niveles predichos (Piñeiro et al., [2016](#)). El modelo puede utilizarse como una medida útil para medir el éxito de predecir la variable dependiente a partir de las independientes (Nagelkerke, [1991](#)).

Como todas las ecuaciones usan como única variable la edad, el R^2 indica que la edad está explicando un 45% la varianza total, lo que ha sido confirmado por otros estudios como el Tanaka et al. ([2001](#)) en el que la edad por sí sola explicó aproximadamente un 80% de la variabilidad; el de Engels et al. ([1998](#)) reportó un 43% de la varianza total y Londeree y Moeschberg ([1982](#)) de un 70 a un 75%.

El porcentaje de explicación puede estar influenciada por otras variables, como se ha visto con el sexo, nivel de actividad física y otras; pero, como lo es en el caso del estudio de Aragón et al. ([1993](#)), los autores deciden utilizar el modelo con una única variable, donde la edad representó el 45% de la variación, a diferencia de un modelo con múltiples variables que logró tan sólo un 49%. Esto es importante porque el valor de R^2 aumenta conforme se añadan variables independientes al modelo, incluso si la variable no es relevante, por lo que hay que tener especial cuidado en aceptar o no la adición de estas (Hagquist y Stenbeck, [1998](#)).

División de grupos por sexo

La muestra total (634) se divide en hombres (474) y mujeres (160) para evaluar si los resultados difieren de acuerdo con el sexo de las personas participantes. Se utilizó la misma ecuación para ambos sexos.

Cuando se realiza el análisis con la ecuación de regresión para cada uno de los subgrupos, se puede notar que la mayoría de las ecuaciones cumplen con ambas hipótesis para el grupo de las mujeres, pero ninguna lo cumple para los hombres.

Esto resulta interesante, ya que, de acuerdo con lo reportado por diferentes autores (Aragón et al., [1993](#); Gellish et al., [2007](#); Tanaka et al., [2001](#)) el sexo no fue un factor explicativo significativo en el modelo que realizaron; pero otros han reportado diferencias entre sexos (Roy y McCrory, [2015](#)), incluso creando ecuaciones diferenciadas para hombres y mujeres (Whaley et al., [1992](#)). Parece ser que esta relación no queda clara entre los autores y aún existe discrepancia al respecto; que puede deberse a los grupos de edad analizados u otros factores. Además, se ha visto que existen diferencias al realizar ejercicio en banda sin fin con los resultados en cicloergómetro (Bouzas-Marins et al., [2013](#)), lo que sigue agregando variables por considerar.

El presente estudio coincide con otros en los que se han diferenciado las ecuaciones entre hombres y mujeres, pero no se encuentra una ecuación que funcione mejor para el primer subgrupo. Los resultados son claros en que, al utilizar las ecuaciones que cumplen las dos hipótesis para las mujeres, los resultados son válidos; a diferencia de cuando se usan en los hombres.

Algunos autores afirman que hay que profundizar la investigación acerca de la influencia que pueda existir por el sexo en la frecuencia cardíaca máxima (Bouzas-Marins et al., [2010](#)), pero ¿cuánta investigación es suficiente? Estos mismos autores citan más de 16 trabajos que ofrecen puntos de vista de cada lado (no hay diferencias o sí hay diferencias respecto al sexo). Hay que reconocer que los seres humanos somos entes muy variables y que por eso, el principio de individualización es claro en la disciplina de las Ciencias del Movimiento Humano y recomendado tanto para la evaluación como para la prescripción del ejercicio (ACSM, [2021](#)).

Por otro lado, la ecuación de Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., [2017](#)) cumple con la hipótesis de la pendiente=1, pero rechaza la de la constante=0. Este caso resulta interesante y lo que sucede es que, a pesar de que la línea es adecuada, no está centrada. La constante >0 ocasionó una transformación de los datos, moviendo la línea hacia arriba, lo que produce que se subestimen los datos de manera consistente a lo largo de todas las FC; por lo que no resultaría válida. Este error podría corregirse cambiando la constante y centrando los datos, pero la ecuación tal y como está presenta un problema al predecir los valores reales.

Al dividir el grupo por sexo, se obtuvo un valor de R^2 de 0,46 para los hombres y de 0,44 para las mujeres. Es decir, a pesar de que el valor sube en los hombres, sigue siendo bastante similar en ambos casos y con respecto al valor para la muestra total. La edad explica en un 46% la FC_{máx.} para los hombres y en un 44% para las mujeres.

División de grupos por edad

La muestra total (634) se divide en aquellos con edades de 40 años o menos (170) y mayores de 40 años (400) para evaluar si los resultados diferían de acuerdo con el grupo de edad de las personas participantes. Para ambos grupos se utiliza la misma ecuación.

Los resultados muestran que algunas de las ecuaciones cumplen con ambas hipótesis para el grupo de menores o iguales a 40 años, mientras que ninguna cumple para el grupo de mayores de 40 años.

Por otro lado, la ecuación de Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., [2017](#)) cumple con la hipótesis de la pendiente=1, pero rechaza la de la constante=0; al igual que al analizar los datos de acuerdo con el sexo.

Resultados similares se han visto en estudios previos en los que la utilización de las ecuaciones se ha propuesto para edades específicas. Por ejemplo en el estudio de Bouzas-Marins y Delgado-Fernández ([2007](#)) la ecuación de Tanaka et al. ([2001](#)) fue la más adecuada para los participantes del estudio, que tenían una media de aproximadamente 21-22 años.

El estudio de Miragaya y Magri ([2016](#)) obtuvo que, la fórmula de Tanaka et al. ([2001](#)) fue más precisa en personas menores de 40 años, lo que se asemeja a los resultados de este estudio en las que algunas ecuaciones resultaron mejores para este grupo de edad. Sin embargo, existe una discrepancia, pues la de Tanaka et al. ([2001](#)) no logra aceptar ambas hipótesis para ninguno de los grupos de edad. En cualquier caso, es aparente que las ecuaciones que predicen FCmax con la edad no son buenas para personas mayores de 40 años.

En cuanto al R^2 , este fue mayor para el grupo de mayores de 40 años (0,40) y disminuye en gran medida para el grupo de menores o iguales de 40 años (0,14). Esto quiere decir que en el grupo de personas menores o iguales tiene una variabilidad mucho mayor, lo que puede estar influenciado por el tamaño de la muestra, que es diferente para ambos grupos y dificulta su interpretación (Hagquist y Stenbeck, [1998](#)).

Es importante recalcar que el R^2 da una medida de acuerdo entre los datos observados y los predichos, pero lo que no se sabe realmente es cuánta varianza debería ser explicada para que el modelo sea bueno, pues se ha dicho que es una medida meramente descriptiva (Hagquist y Stenbeck, [1998](#)).

Sin embargo, se ha planteado que, a pesar de que no se tienen valores establecidos, sí existe una base sobre la que se puede interpretar, siendo 1 un ajuste perfecto y 0 indica que no hay ajuste. Aun así, esto ha sido considerado una limitación que tiene el R^2 (Hagquist y Stenbeck, [1998](#)).

Limitaciones del estudio

- El presente estudio corresponde a un análisis de datos secundario, por lo que algunas variables no fueron controladas, por ejemplo: horario en que fue realizada cada medición, las condiciones ambientales, la persona que hacía la medición, entre otras.
- Para las mediciones de $VO_2\text{max}$ se utilizó un protocolo libre, por lo que, a pesar de que se puede asegurar que se alcanzó un máximo por medio de los criterios establecidos; se limita la comparación con estudios que utilizan otros protocolos.
- Al utilizar una base de datos en la que ya se habían realizado las mediciones, una de las limitaciones es que se utiliza el criterio “FCmax igual o mayor a la FCmax predicha por la ecuación 220-edad , menos 10 lat/min ” como uno de los tres para definir si una prueba era máxima o no. Esto se respalda con el uso de al menos un criterio extra, pero no se recomienda su uso en estudios futuros.

Sugerencias para futuros estudios

- Es importante que, para todas las ecuaciones que se desarrollen, se realice una validación, en poblaciones distintas a las utilizadas para su creación.
- Las ecuaciones creadas deberían reportar el error o rango asociado, para que aquellos que quieran usarlas tengan en cuenta que no son exactas, sino que presentan valores dentro de los que puedan variar. De las ecuaciones presentadas, la de Gellish et al. (2007) reporta un rango de $\pm 5\text{-}8\text{ lat/min}$; la de Nes et al. (2013) presenta un error estándar de medición de $10,8\text{ lat/min}$ y la de Fernhall (2001) de $9,9\text{ lat/min}$. Además, Tanaka et al. (2001) comentan acerca de variaciones de alrededor de 10 lat/min para los valores de cada sujeto. Las demás no lo reportan.
- Las ecuaciones realizadas deben tener su respectiva referencia que se pueda consultar, para obtener información acerca de su elaboración y la población utilizada.

Implicaciones prácticas

Después de muchos intentos por crear una ecuación de predicción de la FCmax se puede notar que las ecuaciones siguen sin ser válidas, especialmente para que sean empleadas de manera genérica. La FCmax parece ser difícil de predecir, por lo que se recomienda que, en caso de que se necesite una medida válida de esta variable se recurra a una prueba directa.

Además, crear ecuaciones para subgrupos específicos puede ser una alternativa para mejorar la predicción de la FCmax. Las ecuaciones que ya se han creado para poblaciones más específicas deben validarse.

En caso de recurrir a una ecuación, de acuerdo con la validación realizada en este estudio, se pueden recomendar las siguientes (Tabla 5):

Tabla 5.

Resumen de las posibilidades de aplicación específica de la ecuaciones testadas para predecir la FCM por sexo y grupo etario.

| Ecuación | H y M | H y M ≤ 40 años | H y M > 40 años | H | M |
|---|-------|--------------------|--------------------|----|----|
| FCM = 220 – edad | No | No | Sí | No | No |
| FCmax = 205-0,64 edad Fernhall et al. (2001) (lat/min) | No | Sí | No | No | Sí |
| FCmax = 207-0,7 edad Gellish et al. (2007) (lat/min) | No | No | No | No | Sí |
| FCmax = 199-0,63 edad Graettinger et al. (1995) (lat/min) | No | Sí | No | No | Sí |
| FCmax = 200-0,72 edad Morris (citada por Pereira-Rodríguez et al., 2017) (lat/min) | No | No | No | No | No |
| FCmax = 211-0,64 edad Nes et al. (2013) (lat/min) | No | Sí | No | No | Sí |
| FCmax = 209-0,587 edad Ricard et al. (1990) (lat/min) | No | Sí | No | No | Sí |
| FCmax = 208-0,7 edad Tanaka et al. (2001) (lat/min) | No | No | No | No | Sí |

Nota. H = Hombres; M = Mujeres. Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIÓN

Ninguna de las ecuaciones analizadas puede ser empleada para predecir la FCmax de manera genérica. Al realizar el análisis de acuerdo con el sexo, seis de las ecuaciones Fernhall et al. (2001), Gellish et al. (2007), Graettinger et al. (1995), Nes et al. (2013), Ricard et al. (1990) y Tanaka et al. (2001) cumplieron con las dos hipótesis para las mujeres, pero ninguna para los hombres; y cuando se realizó de acuerdo con el grupo de edad, 4 de las ecuaciones Fernhall et al. (2001), Graettinger et al. (1995), Nes et al. (2013) y Ricard et al. (1990) cumplieron las hipótesis para el grupo de personas de 40 años o menos, pero no para el grupo de mayores de 40 años.

AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos agradecer de gran manera a María Isabel González Lutz y Ricardo Alvarado Barrantes, quienes hicieron aportes especiales para el análisis de datos.

Además, extendemos el agradecimiento al Dr. Dee W. Edington (q.e.p.d.) y al Dr. M. Anthony Schork (q.e.p.d.), como colaboradores del análisis original de los datos en 1993 (Aragón-Vargas, et al., [1993](#)).

REFERENCIAS

- American College of Sports Medicine. (2021). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription* (11th). Wolters Kluwer.
- Aragón-Vargas, L. F., Schork, A. M., y Edington, D.W. (1993). Evaluation of conventional and new maximum heart rate prediction models for individuals. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 25(5), S10. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/8948/MHR-poster-1993b.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Aragón-Vargas, L. F., Schork, A. M. y Edington, D. (2014). Evaluation of Conventional and New Maximum Heart Rate Prediction Models for Individuals. *Repositorio Kerwá*. Universidad de Costa Rica. <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/8948>
- Aragón-Vargas, L. F., Schork, A. M., y Edington, D. W. (2022). *Base de datos para Evaluation of Conventional and New Maximum Heart Rate Prediction Models for Individuals*. Repositorio Kérwá. Universidad de Costa Rica. <https://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/87278>
- Berrar, D. (2018). Cross-Validation. En: *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology* (Vol. 1, pp. 542-545). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20349-X>
- Bouzas-Marins, J. C., y Delgado-Fernández, M. (2007). Empleo de ecuaciones para predecir la frecuencia cardíaca máxima en carrera para jóvenes deportistas. *Archivos de medicina del deporte*, 24(118), 112-120. https://archivosdemedicinadeldeporte.com/articulos/upload/Original_Ecuaciones_112_118.pdf
- Bouzas-Marins, J. C., Delgado-Fernández, M., y Benito-Peinado, P. J. (2013). Precisión de las ecuaciones para estimar la frecuencia cardíaca máxima en cicloergómetro. *Archivos de Medicina del deporte*, 30(1), 14-20. https://femede.es/documentos/OR_01_ecuaciones.pdf
- Bouzas-Marins, J. C., Ottoline-Marins, N. M., y Delgado-Fernández, M. (2010). Aplicaciones de la frecuencia cardíaca máxima en la evaluación y prescripción de ejercicio. *Apunts. Medicina de l'Esport*, 45(168), 251-258. <https://www.apunts.org/es-aplicaciones-frecuencia-cardiaca-maxima-evaluacion-articulo-X0213371710873503>
- Cruz-Martínez, L. E., Rojas-Valencia, J. T., Correa-Mesa, J. F., y Correa-Morales, C. (2014). Maximum Heart Rate during exercise: Reliability of the 220-age and Tanaka formulas in

healthy young people at a moderate elevation. *Revista de la Facultad de Medicina*, 62(4), 579-585. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-00112014000400010

Engels, H., Zhu, W., y Moffatt, R. (1998). An Empirical Evaluation of the Prediction of Maximal Heart Rate. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69(1), 94-98. <https://doi.org/10.1080/02701367.1998.10607673>

Fernhall, B. O., Mccubbin, J. A., Pitetti, K. H., Rintala, P. A. U. L. I., Rimmer, J. H., Millar, A. L., y De Silva, A. (2001). Prediction of maximal heart rate in individuals with mental retardation. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(10), 1655-1660. <https://doi.org/10.1097/00005768-200110000-00007>

Findley, M.G., Kikuta, K., y Denly, M. (2021). External Validity. *Annual reviews*, 24, 365-393. http://www.michael-findley.com/uploads/2/0/4/5/20455799/arps_2021_external-validity.pdf

Fox III, S.M. y Naughton, J. P. (1972). Physical activity and the prevention of coronary heart disease. *Preventive Medicine*, 1(1-2), 92-120. [https://doi.org/10.1016/0091-7435\(72\)90079-5](https://doi.org/10.1016/0091-7435(72)90079-5)

Gellish, R. L., Goslin, B. R., Olson, R. E., McDonald, A., Russi, G. D., y Moudgil, V. K. (2007). Longitudinal modeling of the relationship between age and maximal heart rate. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 39(5), 822-829. <https://doi.org/10.1097/mss.0b013e31803349c6>

Graettinger, W. F., Smith, D. H., Neutel, J. M., Myers, J., Froelicher, V. F., y Weber, M. A. (1995). Relationship of left ventricular structure to maximal heart rate during exercise. *Chest*, 107(2), 341-345. <https://doi.org/10.1378/chest.107.2.341>

Hagquist, C., y Stenbeck, M. (1998). Goodness of fit in regression analysis -R² and G² reconsidered. *Quality & Quantity* (32), 229-245.

Jackson, A.S. (2007). Estimating maximum heart rate from age: Is it a linear relationship? *Medicine & Science in Sports and Exercise*, 39(5), 821. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318054d3ca>

Judd, C. M., McClelland, G. H., y Ryan, C. S. (2017). *Data Analysis: A Model Comparison Approach to Regression, ANOVA, and Beyond* (3rd ed.). Taylor & Francis.

LeBlanc, D. C. (2004). *Statistics: Concepts and Applications for Science*. Jones and Bartlett.

Lewis-Beck, C., y Lewis-Beck, M. (2015). *Applied regression: An introduction* (Vol. 22). Sage publications.

- Londeree, B.R., y Moeschberger, M.L. (1982) Effect of Age and Other Factors on Maximal Heart Rate. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 53(4), 297-304. <https://doi.org/10.1080/02701367.1982.10605252>
- Machado, F. A., y Denadai, B. S. (2011). Validez de las ecuaciones predictivas de la frecuencia cardíaca máxima para niños y adolescentes. *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, 97(2), 136-140. <https://doi.org/10.1590/S0066-782X2011005000078>
- Mahon, A. D., Marjerrison, A. D., Lee, J. D., Woodruff, M. E., Hanna, L. E. (2010). Evaluating the prediction of maximal heart rate in children and adolescents. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 81(4), 466-471. <https://doi.org/10.1080/02701367.2010.10599707>
- McArdle, W. D., Katch, F. I., y Katch, V. L. (2010). *Exercise physiology: nutrition, energy, and human performance*. Lippincott Williams & Wilkins.
- Mesplé, F., Troussellier, M., Casellas, C., y Legendre, P. (1996). Evaluation of simple statistical criteria to qualify a simulation. *Ecological Modelling*, 88(1-3), 9-18. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00033-X](https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00033-X)
- Miragaya, M. A., y Magri, O. F. (2016). Ecuación más conveniente para predecir frecuencia cardíaca máxima esperada en esfuerzo. *Insuficiencia cardíaca*, 11(2), 56-61. <https://www.redalyc.org/pdf/3219/321946441002.pdf>
- Myers, J., y Bellin, D. (2012). Ramp exercise protocols for clinical and cardiopulmonary exercise testing. *Sports Medicine*, 30(1), 23-29. <https://doi.org/10.2165/00007256-200030010-00003>
- Nagelkerke, N. J. (1991). A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika*, 78(3), 691-692. <https://doi.org/10.1093/biomet/78.3.691>
- Nes, B. M., Janszky, I., Wisløff, U., Støylen, A., y Karlsen, T. (2013). Age-predicted maximal heart rate in healthy subjects: The HUNT Fitness Study. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 23(6), 697-704. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01445.x>
- Pereira-Rodríguez, J. E., Boada-Morales, L., Niño-Ríos, I. M., Cañizares-Pérez, A., y Quintero-Gómez, J. C. (2017). Frecuencia Cardíaca Máxima Mediante 220 Menos Edad versus prueba de esfuerzo con protocolo de Bruce. *Movimiento Científico*, 11(1), 15-22. <http://dx.doi.org/10.33881/2011-7191.mct.11102>
- Piedmont, R.L. (2014). Criterion Validity. En: Michalos, A.C. (Ed.), *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0753-5_618

- Piñeiro, G., Perelman, S., Guerschman, J. P., y Paruelo, J. M. (2008). How to evaluate models: observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological modelling*, 216(3-4), 316-322. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006>
- Portuguez Molina, P., y Aragón Vargas, L.F. (2023). Base de datos para Las ecuaciones predictoras de frecuencia cardiaca máxima no superan prueba clave de validación externa. *Pensar en Movimiento: Revista de Ciencias del Ejercicio y la Salud*, 21(2). <https://doi.org/10.15517/pensarmov.v21i2.57737>
- Povea, C.E., y Cabrera, A. (2018). Utilidad práctica de la monitorización de la frecuencia cardiaca durante el ejercicio. *Revista Colombiana de Cardiología*, 25(3), 169-173. <https://doi.org/10.1016/j.rccar.2018.05.001>
- Ricard, R., Léger, L., y Massicotte, D. (1990). Validity of the “220-age” formula to predict maximal heart rate. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 22(2), pS96. <https://doi.org/10.1249/00005768-199004000-00574>
- Robergs, R. A., y Landwehr, R. (2002). La sorprendente Historia de la Ecuación “FC máx.= 220–edad”. *Official Journal of The American Society of Exercise Physiologists*, 5(2). <https://g-se.com/la-sorprendente-historia-de-la-ecuacion-fc-max.-220-edad-67-sa-457cfb270ee0c9>
- Roy, S., y McCrory, J. (2015). Validation of Maximal Heart Rate Prediction Equations Based on Sex and Physical Activity Status. *International Journal of Exercise Science*, 8(4), 318-330. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27182419/>
- Ruppert, D. (2014). *Statistics and Finance: An Introduction*. Springer New York.
- Smith, E. P., y Rose, K. A. (1995). Model goodness-of-fit analysis using regression and related techniques. *Ecological modelling*, 77(1), 49-64. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(93\)E0074-D](https://doi.org/10.1016/0304-3800(93)E0074-D)
- Tanaka, H., Monahan, K.D., y Seals, D.R. (2001). Age-predicted maximal heart rate revisited. *Journal of the American College of Cardiology*, 37(1), 153-156. [https://doi.org/10.1016/s0735-1097\(00\)01054-8](https://doi.org/10.1016/s0735-1097(00)01054-8)
- Vilcant, V., y Zeltser, R. (2022). Treadmill stress testing. *National Library of Medicine*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK499903/>
- Whaley, M. H, L. A Kaminsky, G. B Dwyer, L. H Getchell, y J. A Norton. (1992). Predictors of Over- and Underachievement of Age-predicted Maximal Heart Rate. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 24(10), 1173-179. <https://europepmc.org/article/med/1435167>