

Monograph

Una Técnica Simple y Exacta para Predecir la Potencia Aeróbica Máxima

Edward L Fox¹

¹Exercise Physiology Research Laboratory, School of Health, Physical Education and Recreation, The Ohio State University, Columbus, Ohio 43210, Estados Unidos.

RESUMEN

Fue desarrollada una técnica para predecir la potencia aeróbica máxima (VO_2 máx.) a partir de datos recolectados de 87 estudiantes universitarios sanos y desentrenados. La predicción estuvo basada en una ecuación lineal que relaciona el VO_2 máx. (espirometría de circuito abierto) con la frecuencia cardíaca submáxima (HR_{SUB}) registrada (por medio de ECG) durante 5 minutos de un ejercicio en bicicleta a 150 W. La ecuación de regresión, error de estimación estándar (s_{YX}), y coeficiente de correlación (r) fueron: VO_2 máx. (l/min) = $6300 - (19,26 \cdot \text{HR}_{\text{SUB}})$; $s_{\text{YX}} = \pm 246$ ml/min ($\pm 7,8\%$); $r = 0.76$ ($p < 0.001$). Las predicciones del VO_2 máx. hechas en un grupo de sujetos tomados de la literatura no fueron estadísticamente diferentes de los valores medidos obtenidos antes y después del entrenamiento físico, o con la variación de la edad (media \pm DS = 3.13 ± 0.43 l/min medido, y 3.10 ± 0.36 l/min predicho; $r = 0.83$, $p < 0.001$, $n = 74$). Fue concluido que este método para predecir el VO_2 máx. es válido, exacto y fácil de usar.

Palabras Clave: Consumo de oxígeno, predicción

INTRODUCCION

Aunque la potencia aeróbica máxima (VO_2 máx.) es quizás la medición simple con mayor validez de la capacidad funcional del sistema cardiorrespiratorio, su uso está limitado principalmente debido a que el test en si mismo es difícil, agotador y con frecuencia es una prueba riesgosa sin considerar el tipo de ergómetro a utilizar. Sin embargo, su utilización, podría incrementarse mayormente con el desarrollo de una técnica simple y precisa para estimar el VO_2 máx., preferiblemente a partir de datos obtenidos durante esfuerzos submáximos. Este es el propósito del presente estudio.

METODOS

La estimación del VO_2 máx. se basó en la relación existente entre el VO_2 máx. medido y la frecuencia cardíaca submáxima (HR_{SUB}) registrada durante el 5to minuto de ejercicio en cicloergómetro con una carga de 150 W. Estos datos fueron obtenidos en 87 varones universitarios, saludables pero desentrenados, cuyas características físicas se presentan en la Tabla 1.

La potencia aeróbica máxima fue determinada realizando sesiones de trabajo que incluyeron series de 5 minutos hasta el agotamiento en un cicloergómetro (velocidad de pedaleo=60 rpm) con un período de recuperación de 10 min entre las series. La carga inicial de trabajo fue de 150 W; las cargas de trabajo para las subsiguientes series se aumentaron en forma progresiva de acuerdo con la respuesta de la frecuencia cardíaca de los sujetos a la serie precedente. Se consideró que los sujetos habían alcanzado el agotamiento (comúnmente luego de 5 o 6 series) cuando no podían pedalear por al menos 3 minutos con una carga 10-15W mayor que a la utilizada en la serie precedente.

El consumo de oxígeno (STPD) fue determinado a partir de la medición espirométrica de volumen de gas espirado en 1 min (bolsas de Douglas) y de las concentraciones de O₂ y CO₂ (analizadores electrónicos Beckman previamente calibrados con gases analizados en Haldane). La frecuencia cardíaca fue determinada a partir de electrocardiogramas. El principal criterio utilizado para determinar que un sujeto había alcanzado la potencia aeróbica máxima fue la nivelación o reducción en el VO₂ con el incremento de la carga; no obstante se utilizaron otros criterios como el agotamiento volitivo, una frecuencia cardíaca mayor a 190 latidos/min y un índice de intercambio respiratorio mayor a la unidad.

Para determinar la precisión de la técnica, se realizaron estimaciones del VO₂ máx. en dos grupos de sujetos cuyos datos fueron extraídos de trabajos publicados en la literatura científica (5, 6, 15). Las características físicas del primer grupo (5, 6 y 5 sujetos del presente estudio), incluyendo la edad, fueron similares a las de los 87 sujetos originales; y las estimaciones fueron realizadas antes (n=24) y luego (n=19) de que los sujetos realizaran un programa de entrenamiento físico. Los programas de entrenamiento fueron diseñados específicamente para incrementar el VO₂ máx. y consistieron principalmente de carreras *cross country* (4, 5) y entrenamientos fraccionados (7).

El segundo grupo de sujetos (15) consistió de sujetos desentrenados con un rango de edad de 23 a 49 años. Las estimaciones para este grupo fueron corregidas por la edad (≥ 25 años) utilizando los factores recomendados por Astrand (1).

RESULTADOS

La respuesta fisiológica al trabajo con la carga de 150W y con la máxima carga se muestran en la Tabla 1.

La relación entre el VO₂ máx. (variable dependiente) y la HR_{SUB} a 150W (variable independiente) se muestra en la Figura 1. Se evaluó esta relación y se halló que era lineal; la ecuación de regresión, calculada por medio del método de cuadrados mínimos fue la siguiente:

$$y = 6300 - 19.26.x$$

Donde y=VO₂ máx. estimado (mL/min), 6300 = Ordenada al origen (mL/min), -19.26 = Coeficiente de regresión (mL/latido), X = HR_{SUB} (latidos/min), registrada durante el 5to minuto de ejercicio con la carga de 150W. Tanto el coeficiente de regresión como el de correlación (+0.76) fueron estadísticamente significativos (p<0.001). El error estándar de estimación (líneas discontinuas en la Figura 1) fue de ± 246 mL/min ($\pm 7.8\%$ de la media de VO₂ máx.).

La comparación de valores estimados y medidos de VO₂ máx. antes y después del entrenamiento y con la edad se muestra en la Figura 2. Las respectivas medias, diferencias medias y coeficiente de correlación se muestran en la Tabla 2. Ninguna de las diferencias medias fue estadísticamente significativa (prueba t para datos apareados). Los rangos de diferencias fueron - 17 a +8%, - 14 a +16% y - 15 a +18%; antes del entrenamiento, después del entrenamiento y con la edad, respectivamente. Todos los coeficientes de correlación (validez) entre los valores medidos y los valores estimados fueron altamente significativos (ver Tabla 2).

DISCUSION

La utilización de la frecuencia cardíaca submáxima como base para la estimación de la potencia aeróbica máxima no es nada nuevo (2, 11, 12). Sin embargo, las anteriores técnicas fueron construidas con la premisa de que la frecuencia cardíaca se incrementa linealmente con el consumo de oxígeno y la carga a través de todo el rango de cargas de trabajo incluida la máxima. Se he mostrado que esta premisa no siempre es verdadera (16, 17); y cuando no lo es, se produce una subestimación del VO₂ máx. El presente nomograma, aun cuando está basado en la frecuencia cardíaca submáxima, es novedoso en cuanto depende solo de la relación que existe entre una única determinación de la frecuencia cardíaca

submáxima y el VO₂ máx. Si hay o no un incremento lineal en la frecuencia cardíaca con el consumo de oxígeno y con la carga es inconsecuente.

Algunos nomogramas para la estimación del VO₂ máx. implican la medición del VO₂, y la frecuencia cardíaca registrada con varias cargas submáximas (11, 12) mientras que otros han utilizado la técnica de regresión múltiple (4, 10, 13), lo que requiere de hasta siete a ocho variables fisiológicas diferentes. Para hacer que la técnica sea simple y práctica, el presente método requiere de solo una carga submáxima sostenida durante 5 minutos y una variable submáxima (la cual puede medirse fácilmente) para hacer la estimación. Sin embargo, se debería mencionar que cuando otras variables que pueden obtenerse de manera simple, tales como las relacionadas con el tamaño corporal (talla y peso), son incluidas a la presente ecuación de regresión, el coeficiente de correlación (múltiple) se incrementa solo hasta +0.78. Esta mínima contribución de las variables relacionadas con el tamaño corporal cuando se estima el VO₂ máx. en un cicloergómetro concuerda con lo hallado por von Döbeln et al. (4).

Variable	Media ± DE	Rango
Edad (años)	19.5±2.3	17-27
Talla (cm)	176.6±6.4	158.8-190.5
Peso (kg)	72.6±10.3	52.7-121.8
<i>Trabajo Submáximo (150 W)*</i>		
VO ₂ (L/min)	2.11±0.13	1.84-2.50
VO ₂ (mL/kg/min)	29.6±3.7	21.8-39.5
VE (L/min) (STPD)	60.8±10.2	37.0-87.6
HR (latidos/min)	163.7±14.8	126.0-202.0
<i>Trabajo Máximo</i>		
VO ₂ (L/min)	3.15±0.37	2.32-4.29
VO ₂ (mL.kg ⁻¹ .min ⁻¹)	43.7±5.2	27.9-55.5
VE (L/min) (STPD)	102.6±17.0	80.0-144.7
HR (latidos/min)	195±8.0	172.0-217.0
Carga de Trabajo (W)	228 ± 27	175-285

Tabla 1. Características físicas de los sujetos (n=87) y sus respuestas al trabajo submáximo (150W) y máximo. DE=desviación estándar. *Medición tomada durante el 5to minuto de ejercicio.

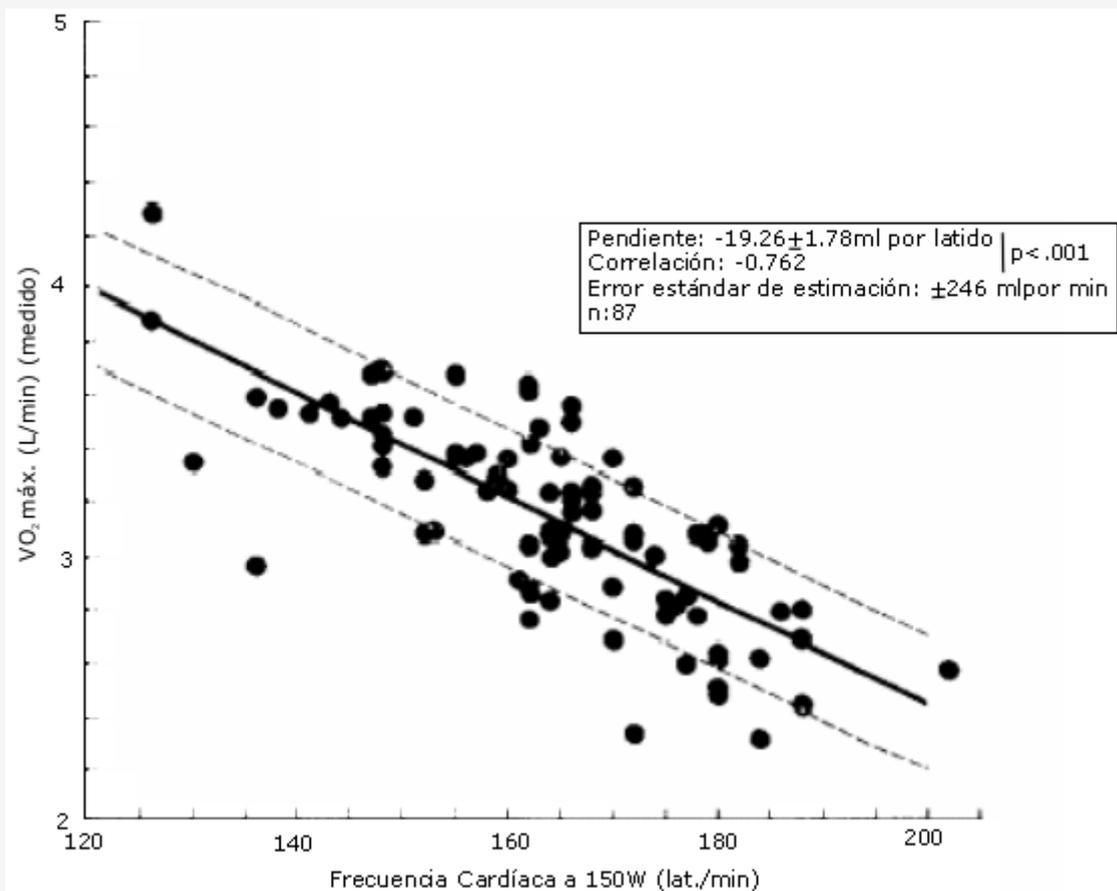


Figura 1. Relación entre el VO_2 máx. y la frecuencia cardíaca a 150 watts. La ecuación de la línea sólida es $y=6300 - 19.26 \cdot x$. Las líneas discontinuas representan ± 1 EE (± 246 mL/min).

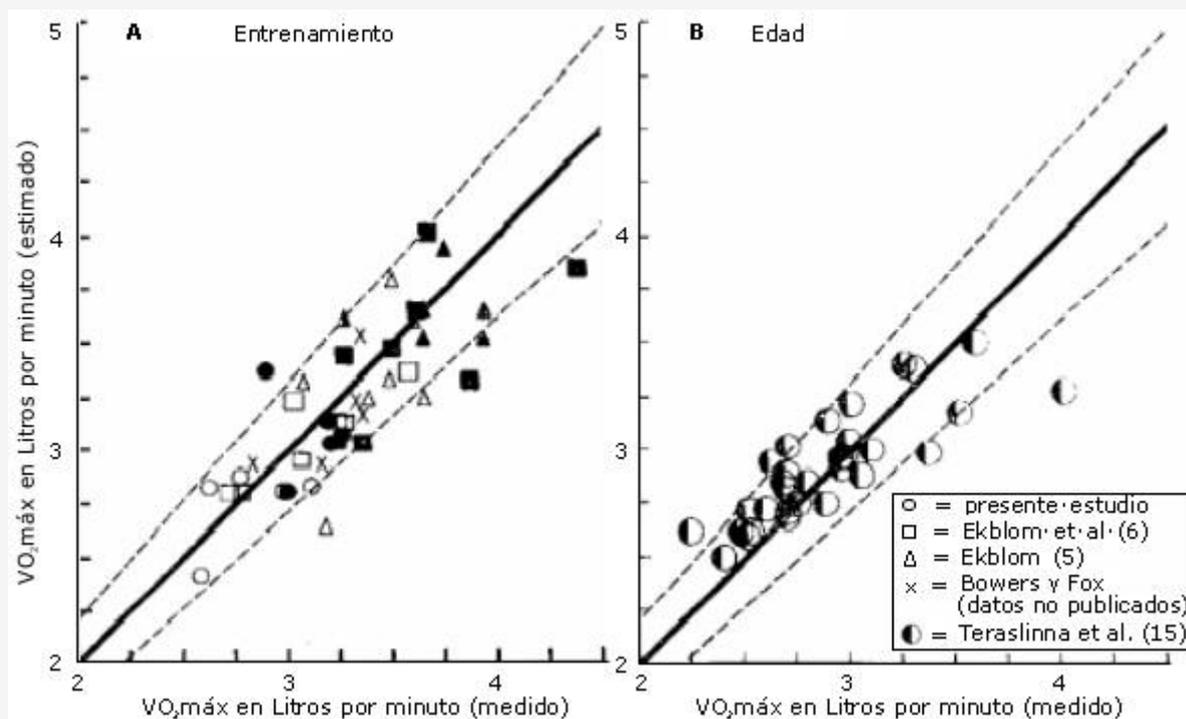


Figura 2. A: Comparación del VO_2 máx. medido y estimado antes (símbolos vacíos) y después (símbolos rellenos) del entrenamiento

físico; y B: con la variación de la edad. Las líneas sólidas son líneas de equivalencia; las líneas discontinuas $\pm 10\%$ de la desviación.

	Entrenamiento*		Rango de Edad, años 23-49 † (n = 31)	Todos los Valores (n = 74)
	Pre (n=24)	Post (n=19)		
Medido	3.15 \pm 0.32	3.51 \pm 0.37	2.89 \pm 0.38	3.13 \pm 0.43
Estimado	3.09 \pm 0.32	3.42 \pm 0.34	2.92 \pm 0.27	3.10 \pm 0.36
Diferencia	0.07 \pm 0.21 (p = NS)	0.09 \pm 0.29 (p = NS)	-0.02 \pm 0.22 (p = NS)	0.03 \pm 0.24 (p = NS)
r	+0.78 (p<0.001)	+0.67 (p<0.005)	+0.82 (p<0.001)	+0.83 (p<0.001)

Tabla 2. Comparación de los valores de VO_2 máx. medido y estimado antes y después del entrenamiento físico y con la edad. Los valores son presentados como valores medios \pm DE. *Datos de: Ekblom et al. (5, 6), presente estudio y Bowers y Fox (datos no publicados). † Datos de: Teraslinna et al. (15).

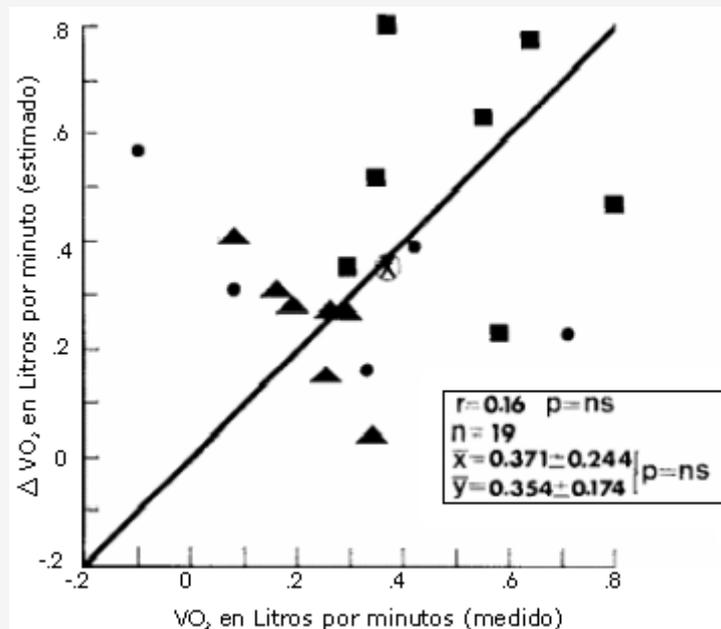


Figura 3. Relación entre los cambios en el VO_2 máx. (ΔVO_2) estimado y medido resultantes del entrenamiento físico. La línea sólida es la línea de equivalencia. Los símbolos son los mismos que en la Figura 2. (\otimes = medias de X e Y).

La explicación más probable para esto es que la relación entre el peso corporal y el VO_2 máx (+0.55, p<0.001) se encuentra incluida en los datos de la HR_{SUB} (150W) debido a que la relación entre la HR_{SUB} y el peso corporal (-0.51, p<0.001) no es significativamente diferente, en magnitud, de +0.55. En la ecuación no lineal múltiple de von Döbelen la frecuencia cardíaca submáxima también fue incluida como variable.

Las estimaciones del VO_2 máx. luego del entrenamiento fueron solo ligeramente menos precisas que las realizadas antes del entrenamiento. De hecho, el valor de +0.67 del coeficiente de correlación entre los valores medidos y los valores estimados no es significativamente diferente del valor de +0.78 obtenido antes del entrenamiento. Esto significa que el cambio estimado en VO_2 máx., debido al entrenamiento, debería ser un indicador razonablemente preciso del cambio verdadero o medido. Sin embargo, en forma individual, se halló que este no es el caso (Figura 3). El muy bajo coeficiente de correlación de +0.16 indica que no existe una relación significativa entre los cambios reales y los estimados. Sin embargo, el cambio medio en el VO_2 máx. medido fue de 371 ± 250 mL/min y el cambio estimado fue de 354 ± 179 mL/min.

Ambos cambios fueron significativamente diferente de los respectivos valores pre-entrenamiento ($p < 0.001$), pero estos valores no difirieron significativamente.

Esta falta de relación es interesante. Primero, parecería que el error de estimación, aunque relativamente pequeño cuando se estima un único valor tal como antes o después del entrenamiento, es bastante grande en comparación con el cambio en el VO_2 máx. resultante del entrenamiento. Por ejemplo, el error estándar de estimación de $\sim \pm 246$ mL/min representa el $\pm 66\%$ de los 371 mL/min de incremento medio en el VO_2 máx. provocado por el programa de entrenamiento. De esta manera, cuando dos valores estimados son sustraídos (ΔVO_2), la diferencia resultante, más que representar un cambio real, representa una mera distribución aleatoria.

Segundo, el cambio estimado en el VO_2 máx. luego del entrenamiento representa en realidad un cambio en la respuesta de la frecuencia cardíaca a una carga fija submáxima. Por lo tanto, la relación no significativa se da entre los cambios medidos en la frecuencia cardíaca submáxima y los cambios medidos en el VO_2 máx. Se ha demostrado que una menor frecuencia cardíaca en respuesta a una carga submáxima fija luego del entrenamiento se debe en un mismo grado al efecto del entrenamiento sobre la circulación y a una mejor en la eficiencia mecánica (6). De esta manera, es posible que la falta de relación pueda deberse en gran parte a la variabilidad individual de los cambios en la eficiencia mecánica provocados por el entrenamiento físico.

La precisión de las estimaciones del VO_2 máx. con la edad respaldan la validez de la corrección por el factor de edad desarrollado por Astrand (1). De hecho, los factores de corrección calculados a partir de los datos en el presente estudio (mediante el cociente entre los datos del VO_2 real y los datos del VO_2 estimado son idénticos a los calculados por Astrand para edades de 35 y 45 años. Asimismo se ha hallado que el factor de corrección de la edad sugerido por van Doblen et al. (4) predice valores más altos y menos precisos.

La observación de la Figura 2B parece sugerir que las predicciones son sobreestimaciones con valores bajos de VO_2 máx. y subestimaciones con valores altos. Esto sugiere una dependencia de la edad, debido a que presumiblemente los hombres de mayor edad podrían tener menores valores de VO_2 máx. y los hombres más jóvenes valores mayores. Sin embargo, la baja correlación ($r=0.02$) calculada a partir de las diferencias entre los valores reales y estimados del VO_2 máx. y la edad no respalda esta idea. Se ha hallado que la precisión de otros métodos para la predicción del VO_2 máx. (2, 10, 12) se encuentra en el rango que va del 2 a los 27% (3, 9, 10, 14). En base a la comparación de los 74 valores de VO_2 máx. medido y estimado (Tabla 2), la precisión total del presente método es de 0.03 ± 0.24 L/min o $0.55 \pm 7.28\%$ ($X \pm DE$). Esto podría tomarse como un error aceptable para estimaciones realizadas en un grupo como así también en forma individual. Particularmente, esto sería preciso para estimaciones realizadas con el propósito de clasificación. Por ejemplo Fox et al (8) han publicado recientemente estándares para el VO_2 máx. en base a una clasificación de cinco puntos: pobre, promedio-bajo, promedio, bueno y excelente. El rango de valores de VO_2 máx. en cada clasificación es de 0.5 L/min, lo cual es dos veces mayor que la desviación estándar del error.

De esta manera se concluye que este método para la estimación del VO_2 máx. es válido y preciso, tanto en forma individual como grupal, tanto antes como después de la realización de un entrenamiento físico y con la variación de la edad. Sin embargo, el cambio estimado en el VO_2 máx. debido al entrenamiento, solo es tiene precisión cuando se calcula en base al cambio grupal.

Este estudio fue respaldado por Medic Medical Sciences Branch, Research Division, Medical Research Branch, Office of the Surgeon General, US Army, bajo Contrato DA-49-1 93-MD-2741.

REFERENCIAS

1. Astrand, I (1960). Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta Physical. Scand Suppl.* 169
2. Astrand, P.-O., and I. Rhyning (1954). A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work. *J. Appl. Physiol.* 7: 218-221
3. Davies, C. T. M (1968). Limitations to the prediction of maximum oxygen intake from cardiac frequency measurements. *J. Appl. Physiol.* 24: 700-706
4. Ekblom, B (1970). Effect of physical training on circulation during prolonged severe exercise. *Acta Physiol. Scand.* 78: 145-155
5. Ekblom, B., P.-O. Astrand, B. Saltin, J. Stenberg, and B. Wallstrom (1968). Effect of training on circulatory response to exercise. *J. Appl. Physiol.* 24: 518-528
6. Fox, E. L., R. L; Bartels, C. E. Billings, D. K. Mathews, R. Bason, and VV. M (1973). Webb Intensity and distance of interval training programs and changes in aerobic power. *Med. Sci. Sports* 5: 18-22

7. Fox, E. L., C. E. Billings, R. L. Bartels, R. Bason, and D. K. Mathews (1973). Fitness standards for male college students. *Intern. Z. Angew. Physiol.* 31: 231-236
8. Glassford, R. G., G. H. Y. Baycroft, A. W. Sedgwick, and R. B. J. MacNab (1965). Comparison of maximal oxygen uptake values determined by predicted and actual methods. 20: 509-514
9. Hermiston, R. T., and J. A. Faulkner (1971). Prediction of maximal oxygen uptake by a stepwise regression technique. *J. Appl. Physiol.* 30: 833-837
10. Margaria, R., P. Adhemo, and E. Rouelli (1965). Indirect determination of maximal O₂ consumption in man. *J. Appl. Physiol.* 20: 1070-1073
11. Maritz, J. S., J. P. Morrison, N. B. Strydom, and C. H. Wyndham (1961). A practical method of estimating an individual's maximum oxygen uptake. *Ergonomics* 4: 97-122
12. Mastropaolo, J. A (1970). Prediction of maximal O₂ consumption in middle-aged men by multiple regression. *Med. Sci. Sports* 2: 124-127
13. Kowell, L. B., H. L. Taylor, and Y. Wang (1964). Limitations to prediction of maximal oxygen intake. *J. Appl. Physiol.* 19: 919-927
14. Teraslinna, P., A. H. Ismail, and D. F. Macleod (1966). Nomogram by Astrand and Rhyning as a predictor of maximum oxygen intake. *J. Appl. Physiol.* 21: 513-515
15. Wyndham, C. H (1967). Submaximal tests for estimating maximum oxygen uptake. *Can. Med. Assoc. J.* 96: 736-742
16. Wyndham, C. H., N. B. Strydom, J. S. Maritz, J. F. Morrison, J. Peter, and Z. U. Poxieter (1959). Maximum oxygen intake and maximum heart rate during strenuous work. *J. Appl. Physiol.* 14: 927-936

Cita Original

Fox, Edward L. A simple, accurate technique for predicting maximal aerobic power. *J Appl Physiol.*; 35 (6): 914-916, 1973