



Determinación de la cinética de la fase dos transitoria de la $\dot{V}O_2$ durante ejercicio de carga constante de intensidades moderada e intensa en hombres jóvenes

Javier Padilla Pérez,^{*,**} John M. Kowalchuk,^{**,****} Albert W. Taylor,^{**,****} Donald H. Paterson^{**,****}

RESUMEN

Se evaluó el análisis de la respuesta transitoria (RT) de la fase dos de la captación pulmonar de O_2 ($\Phi_2 \dot{V}O_2$) durante ejercicio (E) de carga constante de intensidad moderada (M_{OD}) y alta (A_{LTA}), en voluntarios jóvenes masculinos sanos (VMS) ($n = 8$; media \pm DE: 25 ± 3 años). Los voluntarios completaron inicialmente una prueba de rampa (25 W min^{-1}) hasta el esfuerzo máximo para determinar el umbral ventilatorio ($V_E T$) e intensidades de trabajo correspondientes a $80\% V_E T$ (M_{OD}) y $120\% V_E T$ (A_{LTA}). Se seleccionó también una intensidad de trabajo de 50 W (M_{OD}). Transiciones de un paso de las intensidades de trabajo (4 a 6.6 min de duración) fueron iniciadas desde una línea de base de 15 W sin advertir al voluntario. $\dot{V}O_2$ se midió de respiración por respiración en la línea de base y a través de cada transición fue filtrado, interpolado a intervalos de 1 s y en promedio ensamblado para obtener un perfil de respuesta único (PRU) para cada voluntario e intensidad. El PRU de cada voluntario fue ajustado con modelos matemáticos exponenciales (MMEs) de uno (1C), dos (2C), y tres (3C) componentes por medio de diferentes ventanas de ajuste (\rightarrow), y los parámetros estimados (constante de tiempo, T) de cada componente fueron determinados. El mejor ajuste (MA) de MME fue identificado con la prueba de Fisher y/o el significado fisiológico de sus parámetros. Los MA fueron $1C, 4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}}$ para intra $\Phi_2 \dot{V}O_2 M_{OD}$ y A_{LTA} ($T = 25 \pm 8$ s); $2C, 7P_{\text{Líne de Base Inicio} \rightarrow \text{Fin Ejercicio}}$ para M_{OD} ($T = 26 \pm 11$ s) y $3C, 10P_{\text{Líne de Base Inicio} \rightarrow \text{Fin Ejercicio}}$ para A_{LTA} ($T = 28 \pm 10$ s). $\Phi_2 \dot{V}O_2$ ($T = 25.6 \pm 13$ s). Los MMEs_MA fueron aquellos que aislaron la cinética (τ) $\Phi_2 \dot{V}O_2$ del E submáximo en VMS.

Palabras clave: Hombres jóvenes; cinética de la captación de O_2 , fase dos de O_2 ; modelos matemáticos exponenciales, constante de tiempo.

ABSTRACT

The analysis of the phase two pulmonary O_2 uptake ($\Phi_2 \dot{V}O_2$) on-transient response (OTR) during moderate (M_{OD})- and heavy (H_{EAVY})-intensity constant-load exercise (E) was assessed, in young healthy male volunteers (YHM, $n = 8$; mean \pm SD: 25 ± 3 yrs). YHM completed an initial incremental ramp test (25 W min^{-1}) to volitional fatigue from which the ventilatory threshold ($V_E T$) and work rates corresponding to $80\% V_E T$ (M_{OD}) and $120\% V_E T$ (H_{EAVY}) were identified. Also, a work rate of 50 W (M_{OD}) was selected. Step-transitions in work rate (4 to 6, lasted 6 min) were initiated from a baseline of 15 W without warning to the volunteers. The $\dot{V}O_2$ data was measured breath-by-breath at baseline and throughout each transition; they were filtered, interpolated to 1-s intervals and ensemble-averaged to yield a single response profile (SRP) for each volunteer and intensity. The SRP for each volunteer was fit with a one- (1C), two- (2C), and three-component (3C) exponential model (EMM) by using different fitting windows (\rightarrow), and parameter estimates (time constant, τ) were determined for each component. Best fitting (BF) EMM was identified based on the Fisher's test and/or parameter's physiological meaning. The $1C, 4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}}$ provided the BF for the intra $\Phi_2 \dot{V}O_2 M_{OD}$ and H_{EAVY} ($T = 25 \pm 8$ s); $2C, 7P_{\text{Base Line Start} \rightarrow \text{End Exercise}}$ did BF for M_{OD} ($T = 26 \pm 11$ s) and $3C, 10P_{\text{Base Line Start} \rightarrow \text{End Exercise}}$ did BF for H_{EAVY} ($T = 28 \pm 19$ s). $\Phi_2 \dot{V}O_2$ ($T = 25.6 \pm 13$ s). The BF_EMMs were those isolating $\Phi_2 \dot{V}O_2$ OTR kinetics (τ) for submaximal E in YHM.

Key words: Young men; O_2 uptake kinetics, phase two O_2 ; exponential mathematical models, time constant.

INTRODUCCIÓN

Las tres fases de la respuesta cardiopulmonar (Φ_1, Φ_2, Φ_3) desde el inicio hasta el final del ejercicio, forman la res-

puesta transitoria (RT) total del ejercicio. Las de la captación pulmonar de oxígeno ($\Phi_1 \dot{V}O_2, \Phi_2 \dot{V}O_2, \Phi_3 \dot{V}O_2$) son funciones exponenciales (FME),¹ que incluyen un tiempo de retraso (TD) o modelo de $1C_{\text{componente}}$ o más complejos

* Escuela Superior de Medicina del Instituto Politécnico Nacional.

** Canadian Centre for Activity and Ageing, School of Kinesiology.

*** Department of Physiology and Faculties of Health Sciences &

**** Medicine and Dentistry, The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada N6A 3K7.

como 2C y el 3C.¹ Con estos modelos matemáticos exponenciales (MMEs), se puede describir una respuesta cardiovascular transitoria del ejercicio ergométrico, mediante la modelación de un periodo transitorio total o parcial llamado ventana transitoria de modelación, es decir, un periodo de tiempo ajustado por un modelo: desde → hasta.²

Modelos matemáticos exponenciales

FME: Tiene la expresión $\Delta VO_2(t) = a_0 + a \cdot [1 - e^{-(t/\tau)}]$, donde $\Delta VO_2(t)$ es el cambio de masa por unidad de tiempo ($d\Delta VO_2 \cdot dt^{-1}$) asumiendo $TD = 0$; a_0 es la línea de base de ΔVO_2 ; a es el valor numérico de la distancia de ΔVO_2 desde a_0 hasta el ΔVO_2 requerido o del estado estable; por ejemplo, a es la diferencia entre la ΔVO_2 de la a_0 del pedalear sin resistencia un cicloergómetro y el valor final de la RT de ΔVO_2 del ejercicio (RT ΔVO_2 E) de pedalear contra una resistencia determinada en el cicloergómetro; $1 - e^{-(t/\tau)}$ es la distribución exponencial negativa,³ $e^{-(t/\tau)}$ es el factor de decremento con la constante de tiempo τ , para un incremento exponencial en la RT ΔVO_2 E, t es el tiempo en el que la RT ΔVO_2 E decae exponencialmente; $t = T$, es el tiempo que requiere la RT ΔVO_2 E para decaer hasta una parte de e^{-1} (0.3678) de su valor original, así, $T = 1 - 0.3678 = 0.63$, y $e = 2.718281 = [(1 + n^{-1})]^n$, $n \geq 10$ y e es incommensurable con 1. La τ es el parámetro de tiempo requerido para lograr un 63% de la amplitud final (total) o aproximarse dentro de 37% de la amplitud final de una respuesta exponencial a partir de una intensidad del ejercicio menor ($< V_E T = M_{OD}$) o mayor ($> V_E T = A_{LTA}$) al $V_E T$.^{1,4} Esta FME simple modela con tres parámetros (3P_{ármatos}: a_0 , a , y T) (modelo FME,3P).

Modelo 1C: FME que incluye un TD¹ y conlleva al modelo 1C con 4P_{ármatos} (a_0 , a , TD, y T), expresado como (modelo 1C,4P): $\Delta VO_2(t) = a_0 + a \cdot [1 - e^{-(t - TD)/\tau_1}]$, modela tanto la RT total de la Φ_{2p} de Whipp⁵ de ΔVO_2 M_{OD} con 1C,4P_{início $\Phi_{2p} \rightarrow$ Fin Ejercicio}; (Φ_{2p} $\text{início} \rightarrow \text{Fin}$ ΔVO_2)⁶⁻⁹ y con 1C,4P_{início $\Phi_{2p} \rightarrow$ Fin F_{2p}} (Φ_{2p} ΔVO_2) dentro de la RT total de M_{OD} ¹⁰ y de A_{LTA} .¹⁰

Al modelar la RT total de la ΔVO_2 M_{OD} ¹¹ con 2C se ajustan dos períodos de intervalo de tiempo unidos, transitorios y exponenciales con 7P_{ármatos} (a_0 , a_1 , TD1, T1; a_2 , TD2, y T2), expresado como (2C,7P): $\Delta VO_2(t) = a_0 + a_1 \cdot [1 - e^{-(t - TD1)/\tau_1}] + a_2 \cdot [1 - e^{-(t - TD2)/\tau_2}]$, donde los subíndices 1 y 2 de los parámetros corresponden a los períodos de intervalo de tiempo primero y segundo respectivamente.^{12,13} El 2C,7P_{início $\Phi_{2p} \rightarrow$ Fin} ajusta la RT Φ_{2p} ΔVO_2 A_{LTA} .¹⁴

Al modelar la RT total ΔVO_2 A_{LTA} ^{12,15} con un 3C se ajustan tres períodos de intervalo de tiempo unidos, transitorios y exponenciales con 10P_{ármatos} (a_0 , a_1 , TD1, T1; a_2 ,

TD2, T2; a_3 , TD3, T3), expresado como (3C,10P): $\Delta VO_2(t) = a_0 + a_1 \cdot [1 - e^{-(t - TD1)/\tau_1}] + a_2 \cdot [1 - e^{-(t - TD2)/\tau_2}] + a_3 \cdot [1 - e^{-(t - TD3)/\tau_3}]$. Si TD2 = TD3 entonces 3C,10P es 3C, 9P¹⁶. Los 1C, 2C, y 3C se han usado para describir la RT ΔVO_2 M_{OD} y A_{LTA} ,² lo que abrió, una antepuerta para estudiar la cinética de la Φ_{2p} ΔVO_2 teórica transitoria del ejercicio.^{5,14,17}

Whipp⁵ postuló (p) que durante la Φ_{1p} la ΔVO_2 incrementa su respuesta siguiendo el inicio del E y tiene una duración ≈ 15 a 20 s (Φ_{1p}) sin cambio en la mezcla venosa de las presiones parciales de O_2 y de bióxido de carbono (CO_2)¹⁸⁻²¹ y sea cierto o no que la Φ_{1p} termina entre 15 y 20 s (el inicio de la fase Φ_{2p}) después de iniciado el ejercicio, es motivo de debate. La Φ_{2p} termina ≈ 3 min del ejercicio (Φ_{2p} ΔVO_2), para así dar inicio a la Φ_{3p} ΔVO_2 . La RT Φ_{2p} ΔVO_2 del ejercicio, que le sigue a la Φ_{1p} , dura de 2 a 4 min⁴ y muestra aumentos en la ventilación espirada (V_E) e intercambio gaseoso pulmonar (ΔVO_2 , ΔCO_2).^{4,22} El mecanismo responsable de la cinética de la Φ_{2p} ΔVO_2 (por ejemplo, T ΔVO_2) puede ser multifactorial²³⁻²⁵ y es motivo de debate, si está o no limitado por ΔVO_2 Metabólico o por mecanismos de transporte del O_2 ;^{26,27} por ello, existe la necesidad de determinar su mejor modelación matemática a diferentes intensidades de ejercicio.

Hipótesis

Si la respuesta transitoria de la Φ_{2p} ΔVO_2 a funciones forzadas de ejercicio submáximo es modelada de forma similar, en términos de T Φ_{2p} ΔVO_2 , por modelos matemáticos exponenciales con diferentes ventanas transitorias de ajuste, entonces no diferirán estadísticamente los valores numéricos de la T Φ_{2p} ΔVO_2 , en adultos jóvenes.

MATERIAL Y MÉTODOS

Voluntarios

Participaron, de 4 a 7 ocasiones separadas por lo menos por 2 días, ocho hombres voluntarios, adultos, jóvenes y sanos. El Consejo Universitario de Revisión de Investigación en Sujetos Humanos aprobó esta investigación.

Prueba de rampa en cicloergómetro

Cada voluntario realizó una prueba computada de esfuerzo máximo tipo rampa (25 W•min⁻¹) en un cicloergómetro (Lode, Model H-300-R) con ergoespirometría de circuito abierto (Ventilation Measurement Module-110, Alpha Technologies; Perkin Elmer MGA-1100 o Airspec MGA2000) de medición de respiración por respiración²⁸

para determinar: $\dot{V}_E T$,²⁹⁻³¹ $\dot{VO}_{2\text{pico}}$, la frecuencia cardiaca pico y la intensidad máxima de trabajo. Fueron calculados la \dot{VO}_2 del $\dot{V}_E T$ ($\dot{V}_E T \dot{VO}_2$),³² la intensidad de trabajo correspondiente a la \dot{VO}_2 para 80% $\dot{V}_E T$ (80% $\dot{V}_E T \dot{VO}_2$ equivalente en W) y para 120% $\dot{V}_E T$ (120% $\dot{V}_E T \dot{VO}_2$ equivalente en W).²

Pruebas submáximas

Los voluntarios hicieron ejercicio cíclico constante pedaleando a 60 revoluciones por min; 6 min de pedaleo sin resistencia, seguida por un aumento de potencia desarrollada a una función de un solo paso (6 min de ejercicio ergométrico, con resistencia) y finalmente 6 min sin resistencia (recuperación) correspondiente a M_{OD} y A_{LTA} ³³ diferentes; en el que 50W de M_{OD} (Absoluta, $M_{OD}\text{Abs}$) fue de 4 a 6 repeticiones, mientras que las producciones de potencia correspondientes a 80% $\dot{V}_E T$ ($M_{OD}\text{Rel}$) constó de 4 a 6 repeticiones y a 120% $\dot{V}_E T$ ($A_{LTA}\text{Rel}$) ocurrió de 2 a 4 repeticiones para cada voluntario, con ≈ 6 a 10 min de recuperación entre cada transición y asignadas en el orden mencionado por visita. Los datos cardiopulmonares fueron sumados matemáticamente y entonces reportados ya sea de respiración por respiración o por unidad de tiempo (\dot{V}_E , \dot{VO}_2 , \dot{VCO}_2 , \dot{VCO}_2 / \dot{VO}_2 , $P_{ET}O_2$, $P_{ET}CO_2$, \dot{V}_E / \dot{VO}_2 , y \dot{V}_E / \dot{VCO}_2 ; P_{ET} , presión parcial del gas al final del volumen corriente) mediante un integrador análogo y una computadora. La frecuencia cardiaca fue medida con un electrocardiógrafo (Harcos, Sauborn Modelo 500-1100) y se monitoreó con un tacómetro.

Análisis de datos

Cada respuesta única de datos sobrepuertos de 50W, 80% $\dot{V}_E T$, y 120% $\dot{V}_E T$ se usó para determinar la cinética (T2) de la RT \dot{VO}_2 E submáximo. Determinamos en la Φ_3 \dot{VO}_2 la magnitud de los datos de $\Delta\dot{VO}_2$ como la diferencia entre la \dot{VO}_2 al final del ejercicio y la \dot{VO}_2 a los 3 min del mismo ($\Delta\dot{VO}_2(6\text{ min} - 3\text{ min})$).³³ El \dot{VO}_2 a los 3 min fue la media de \dot{VO}_2 entre los 2.75 y 3.15 min de ejercicio y la \dot{VO}_2 al final del ejercicio fue la media de \dot{VO}_2 durante los últimos 0.25 min de ejercicio.² También calculamos la pendiente de la relación subumbral de la dependencia de \dot{VO}_2 respecto a la generación de potencia y de la \dot{VO}_2 durante el pedaleo cíclico sin resistencia.²

Modelación matemática

La RT \dot{VO}_2 E submáximo fue modelada con 1C, 2C y 3C de diferentes ventanas de ajuste (11 MMEs) para un periodo de tiempo específico: desde 20 s después de ini-

ciado hasta los 3 min (0.3333 min → 3 min) o 6 min (0.3333 min → 6 min) de ejercicio; desde el inicio hasta el fin del ejercicio (0 min → 6 min,); desde una línea de base de 2 min de duración (LB) hasta Fin (LB → 6 min) o hasta el fin teórico de la Φ_{2p} (LB → 3 min). Estos 11 MMEs fueron: 1C,4P_{inicio} $\Phi_{2p} \rightarrow$ fin Φ_{2p} , 1C,4P_{inicio} $\Phi_{2p} \rightarrow$ Fin, 1C,3P_{LB → Fin}, 1C,4P_{inicio → 6 min}, 1C,4P_{LB → Fin}, 2C,7P_{inicio → Fin}, 2C,7P_{LB → fin} Φ_{2p} , 2C,7P_{LB → Fin}, 3C,9P_{inicio → Fin}, 3C,9P_{LB → Fin} y 3C,10P_{LB → Fin}. En particular la T $\Phi_2 \dot{VO}_2$ fue comparada conjuntamente con un análisis estadístico de qué tan bien ajustó los puntos de referencia (datos) experimentales de \dot{VO}_2 cada MME. La aceptabilidad de los mejores ajustes (MAs) por los MMEs (MMEs_MAs) fueron evaluados primariamente sobre la base de que éstos aportaran información que fuera consistente con la interpretación actual de la RT \dot{VO}_2 (evaluación fisiológica, Fis); así como por sus méritos estadísticos (evaluación estadística, Est).

Análisis estadístico

La calidad del ajuste de cada MME se evaluó con la suma más baja de regresión de los cuadrados (valores RSS) o desviaciones explicadas desde la media cuadrada no lineal, de la técnica computada de regresión no lineal.³⁴ El mejor ajuste estadístico de un MME, se evaluó con los RSS que ajustaron el mismo número de puntos de referencia experimentales o con la suma de error de los cuadrados (MSE) que son las desviaciones internas que modela el cuadrado de la media, por medio de la prueba de Fisher (F_{valor} , a 0.05 α).^{35,36} El número necesario de permutaciones para las comparaciones de modelos fue expresado como una función factorial.³⁶ Se aplicó un análisis de varianza unidireccional ANOVA; Student-Newman-Keuls o Tukey post-hoc; un Kruskal-Wallis ANOVA; Dunns, y prueba t- de Student para comparar parámetros temporales³⁶ (significancia de $p \leq 0.05$). Mientras no se especifique lo contrario, todos los datos numéricos son media \pm D_{esviación} E_{stándar}.

RESULTADOS

Características físicas, pruebas de ejercicio de rampa y de carga constante

Las características físicas, los valores cardiopulmonares máximos y $\dot{V}_E T$ se muestran en la cuadro 1. Un ejemplo de $\dot{V}_E T$ se muestra en la figura 1. La \dot{VO}_2 al final del ejercicio, la potencia generada absoluta y relativa al $\dot{V}_E T$ (% $\dot{V}_E T$) se muestran en el cuadro 2. Los W fueron diferentes entre las tres pruebas submáximas ($M_{OD}\text{Abs} < M_{OD}\text{Rel} < A_{LTA}\text{Rel}$) (Cuadro 2) y también lo fueron sus \dot{VO}_2 Fin

Cuadro 1. Datos de la muestra de ocho hombres jóvenes.

Variable	Media ± desviación estándar
Antropometría general:	
Edad, años	25.0 ± 2.8
Estatura, cm	179.6 ± 5.3
Masa corporal total, kg	79.1 ± 8.7
Ergoespirometría pico:	
Potencia ergométrica, Watts	249.8 ± 42.9
Potencia aerobia (VO ₂):	
VO ₂ , l•min ⁻¹	3.7 ± 0.6
VO ₂ , mL•min ⁻¹ •kg ⁻¹	47.4 ± 6.0
Frecuencia cardiaca:	
220 - Edad en años, latidos•min ⁻¹	191.7 ± 13.1
Experimental, latidos•min ⁻¹	195.0 ± 2.8
Umbral ventilatorio (VE _T):	
VE _T , mL•min ⁻¹	1919.0 ± 189
VE _T , %VO ₂	51.9 ± 4.2
Cinética de la fase dos transitoria de VO ₂ del Ejercicio submáximo	
Constante de tiempo (τ), s	25.6 ± 13.0

Ejercicio (Cuadro 1) y éstos últimos resultaron diferentes respecto al VO₂ VE_T y a su %VE_T (Cuadro 2). Los W calculados como W_{intensidad del ejercicio} / W_{VE_T} en (%), resultaron 41.6 ± 7.1 M_{OD}Abs < 68.1 ± 2.5 M_{OD}Rel < 130.2 ± 4.8 A_{LTA}Rel (F_{valor} = 28, p < 0.0002). Además, las VO₂ 6 min ejercicio (mL•min⁻¹) fueron diferentes entre las pruebas submáximas (F_{valor} = 7.5, P < 0.0001) (Cuadro 2); como también lo fueron (F_{valor} = 7.5, P < 0.0001) las VO₂ 3 min ejercicio (mL•min⁻¹): 1158 ± 111 M_{OD}Abs < 1597 ± 238 M_{OD}Rel < 2504 ± 476 A_{LTA}Rel. A_{LTA} mostró (ΔVO₂(6 min - 3 min)) = 212 ± 78, mL•min⁻¹ una VO₂ 6 min ejercicio (2716 ± 380 A_{LTA}Rel) mayor que (F_{valor} = 3, p < 0.03) VO₂ 3 min ejercicio (2504 ± 476 A_{LTA}Rel).

Regresión lineal de la VO₂

$$\text{VO}_2 \text{ M}_{\text{OD}} (\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}) = 537.72 + (12.96 \cdot W), n = 16, R = 0.95, P < 0.001; \text{VO}_2 \text{ Línea de base} = 732 \pm 81 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}.$$

Modelación matemática

Un ejemplo del curso temporal de la VO₂ y su T_{Φ₂ VO₂}, de los MMEs_MAs de las pruebas submáximas (1C,4P_{inicio Φ_{2p} → fin F_{2p}}, T_{Φ_{2p}} VO₂ E submáximo (Figs. 2 a 4) de 50W (2C,7P_{LB → 6 min}, T_{Φ_{2A_Fis:LB → Fin}} VO₂ M_{OD}), 80%VE_T (2C,7P_{LB → 6 min}, T_{Φ_{2A_Fis:LB → Fin}} VO₂ M_{OD}), y 120%VE_T (3C,10P_{LB → Fin}, T_{Φ_{2A_Fis:LB → Fin}} VO₂ A_{LTA}) se muestran en las figuras 2, 3, y 4 respectivamente. La amplitud y los pará-

metros estimados, determinados en el análisis de la T RT VO₂ del E submáximo, con los MMEs_MAs, se muestran en los cuadros 3 y 4.

Los RSS y MSE estimados de dicho análisis con 11 diferentes MMEs de ajuste, se muestran en el cuadro 5. Las permutaciones y las comparaciones entre 1C, 2C y 3C para la RT VO₂ E submáximo se muestran en el cuadro 7. Mientras que sólo el modelo de ajuste 1C,4P_{0.3333 min → 3 min} distinguió numéricamente la T dentro del la Φ_{2p} VO₂ E submáximo (Cuadros 6 y 7; Figs. 2-4), por su parte los modelos de ajuste 2C,7P_{0 min → 6 min} (Φ_{2 A_Est & Fis:inicio → Fin}) y 2C,7P_{LB → 6 min} (Φ_{2 A_Fis:LB → Fin}) ajustaron mejor la Φ_{2Aislada} VO₂ M_{OD} y su T2. Además, únicamente el modelo de ajuste 3C,10P_{LB → 6 min} por su significado Fis, distinguió la Φ_{2A_Fis} VO₂ A_{LTA} y su T2 (Cuadros 3 y 4; Fig. 4).

Modelación RT VO₂ ejercicio submáximo

Para el MA de la Φ_{2A} VO₂ A_{LTA} Rel y su T2, se prefirió a 1C,4P_{0.3333 → 3 min} (T_{Φ_{2p}} VO₂ = 30.9 s) respecto a 2C,7P, por ser 1C,4P_{inicio p → fin p} práctico (modela dentro de la RT Φ₂ VO₂), simple (tiene un número mínimo de parámetros temporales), y también para cuando no se cuente con una línea de base adecuada o exista una influencia diferente previa. El 1C, 4P_{inicio p → fin p} estima numéricamente bien la T RT Φ₂ VO₂ E submáximo (T_{Φ_{2p}} VO₂). En consecuencia, el MME que mejor ajustó dentro de la RT Φ₂ VO₂ E submáximo y su cinética fue 1C,4P_{0.3333 min → 6 min} (T_{Φ_{2p}}) (Cuadro 7).

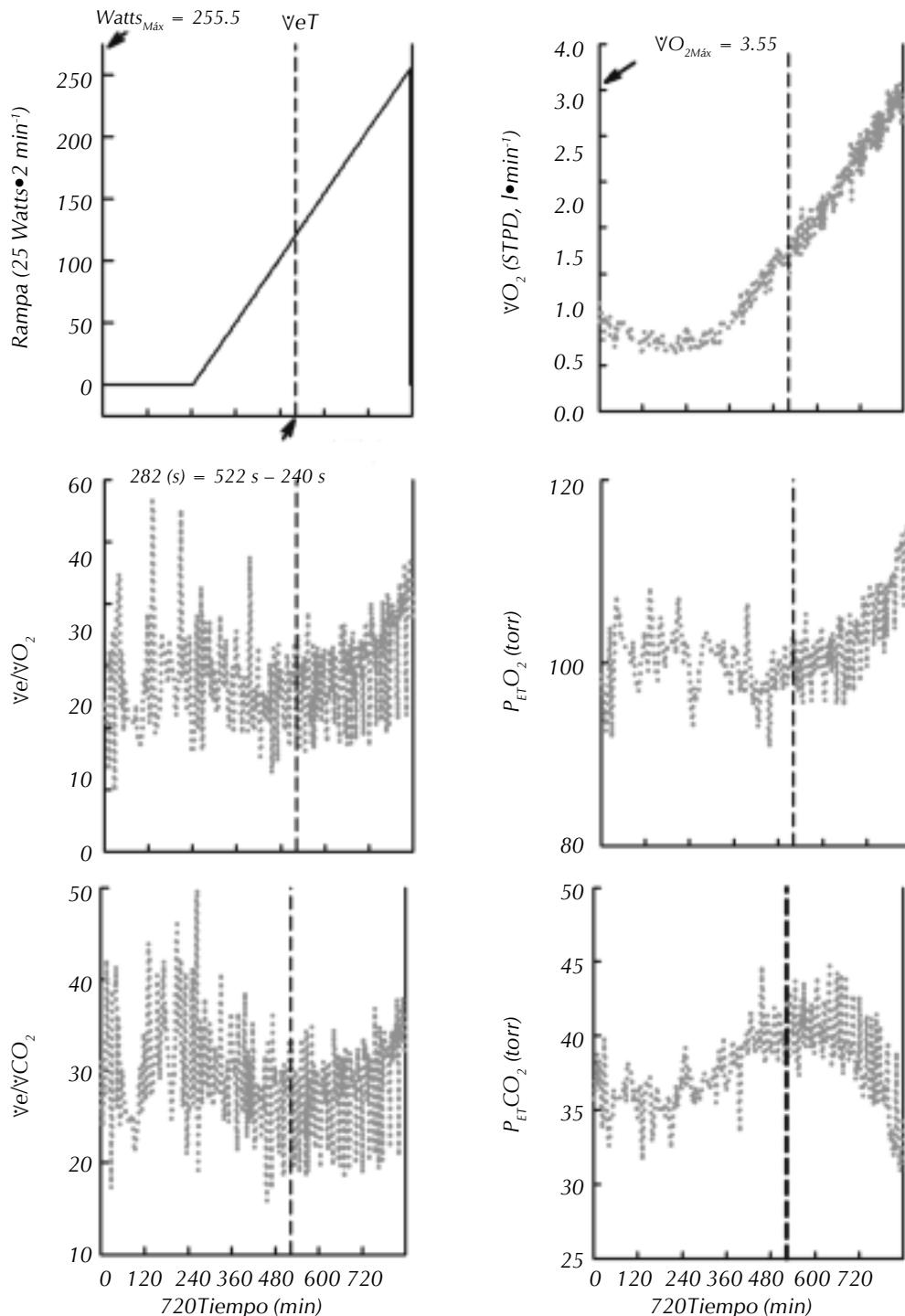


Figura 1. Ejemplo de umbral ventilatorio ($\dot{V}eT$, línea punteada sobre las abscisas) en un voluntario joven, en el que se observó: 1) $\dot{V}eT$ a los 117.5 Watts de un máximo de 255.5 Watts (gráfica superior izquierda) equivalente a 52.1% de la captación pulmonar máxima de oxígeno ($\dot{V}O_2\dot{V}eT = 1875 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) (gráfica superior derecha) y 2) $\dot{V}eT$ se observó a los 282 segundos cuando el equivalente ventilatorio de O_2 ($\dot{V}e/\dot{V}O_2$) y su presión parcial al final del volumen corriente ($P_{ET}O_2$) mostraron un aumento sistemático (gráficas centrales) al mismo tiempo que el equivalente ventilatorio de CO_2 ($\dot{V}e/\dot{V}CO_2$) y su $P_{ET}CO_2$ no aumentaron (gráficas inferiores).

Cuadro 2. Datos del ejercicio submáximo de ocho hombres jóvenes.

Moderada			Intensidad				Alta				
Potencia Absoluta (PO, 50W) ^b			Moderada				Relativa (120% $\dot{V}E$ T)				
$\dot{V}O_2$ (mL•min ⁻¹)	% $\dot{V}E$ T	% $\dot{V}O_2$ pico	PO (W)	$\dot{V}O_2$ (mL•min ⁻¹)	% $\dot{V}E$ T	% $\dot{V}O_2$ pico	PO (W)	$\dot{V}O_2$ (mL•min ⁻¹)	% $\dot{V}E$ T	% $\dot{V}O_2$ pico	$\dot{V}E$ T (W)
1182 ^a ± 87	62 ^c ± 6.6	32 ± 4	84.3 ^b ± 14	1632 ^a ± 213	85 ^c ± 4.7	44 ± 4	160.4 ^b ± 22.7	2716 ^a ± 380	142.5 ^c ± 11.2	75 ± 10	123.7 ^b ± 20

Los valores numéricos son Media ± DE.

Las diferencias significativas entre medias con las mismas letras, fueron identificadas mediante un procedimiento ANOVA- post hoc Student Newman-Keuls: $^aF_{valor} = 6.4$, $p < 0.001$ (incluye diferencias con la media $\dot{V}O_2 \dot{V}E$ T = 1919 ± 189 a, $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$); $^bF_{valor} = 7.5$, $p < 0.001$; $^cF_{valor} = 30$, $p < 0.001$.

% $\dot{V}E$ T fue calculado como $(\dot{V}O_2 \text{ de la intensidad del ejercicio}) / (\dot{V}O_2 \dot{V}E$ T) • 100.

$\dot{V}E$ T: Umbral ventilatorio.

W: Watts.

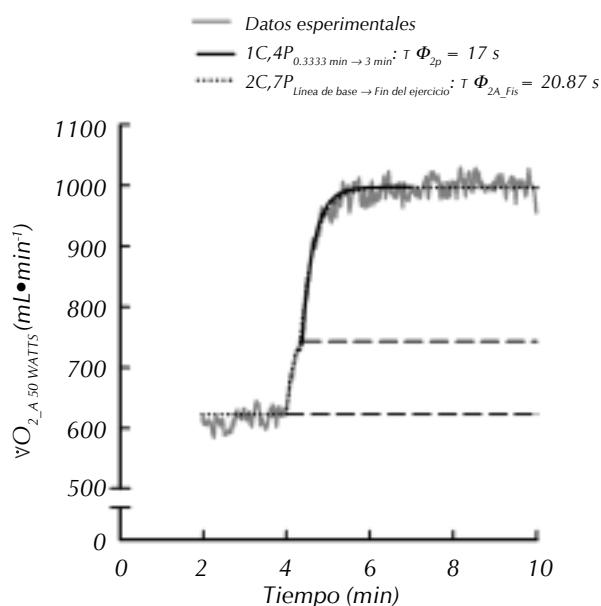


Figura 2. Curso temporal de la captación pulmonar de oxígeno ($\dot{V}O_2$) durante la respuesta transitoria al ejercicio de intensidad moderada (50 Watts de carga absoluta). El mejor ajuste dentro de la fase dos postulada de la $\dot{V}O_2$ la hizo el modelo de conveniencia $1C, 4P_{0.3333 \text{ min ejercicio} \rightarrow 3 \text{ min ejercicio}} (\Phi_{2p})$. El mejor ajuste fisiológico (Fis) para la fase dos aislada ($\Phi_{2A, Fis}$) de la $\dot{V}O_2$ la hizo el modelo $2C, 7P_{\text{Línea de base} \rightarrow \text{Fin}}$. Las estimaciones del tiempo requerido para lograr 63% de la respuesta (amplitud) total o para acercarse dentro de 37% de la amplitud final de una respuesta exponencial de la Φ_2 son $\tau \Phi_{2p}$ y $\tau \Phi_{2A, Fis}$. Los $7P_{\text{árametros}}$ que describen el curso temporal de estos datos de $\dot{V}O_2$ son: a_0' la línea de base de $\dot{V}O_2$ (2C modeló una ventana desde los 2 minutos de línea de base, antes de Inicio, hasta Fin del ejercicio); a_1 y a_2 (líneas punteadas largas) son los incrementos en la amplitud de la $\dot{V}O_2$ por arriba del valor de a_0' ; $\tau 1$ y $\tau 2$ son las constantes de tiempo; $TD1$ y $TD2$ son los tiempos de retraso; y $A_{tot} = a_1 + a_2$.

Modelación RT $\dot{V}O_2 M_{OD}$

El $2C, 7P (\tau \Phi_{2A, Est: LB \rightarrow fin} \text{ o } \tau \Phi_{2A: LB \rightarrow Fin})$ resultó MA Est que $1C, 4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 6 \text{ min}} (\tau \Phi_{2p})$ pero, sólo para $M_{OD, Abs}$ (Cuadro 7). Los $2C, 7P_{LB \rightarrow 3 \text{ min}} (TD2 = 25 \text{ s} \text{ y } \tau 2 = 21 \text{ s})$, $2C, 7P_{0 \text{ min} \rightarrow 6 \text{ min}} (TD2 = 24.3 \text{ s} \text{ y } \tau 2 = 24.5 \text{ s})$ y $2C, 7P_{LB \rightarrow 6 \text{ min}} (TD2 = 25.5 \text{ s}, \tau 2 = 23 \text{ s})$ mostraron MA Est que $1C, 4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}} (\tau 2 = 22.9 \text{ s})$ para la RT $\dot{V}O_2 M_{OD, Abs}$, es decir, $2C, 7P (\Phi_{2A, Est: LB \rightarrow fin})$ MA Est comparado con $1C, 4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}} (\Phi_{2p})$. La $\tau \Phi_{2A, Est: LB \rightarrow fin}$ fue de duración similar (21 s) a la $\tau \Phi_{2p} \dot{V}O_2$ (23 s); es decir, $M_{OD, Abs}: \tau \Phi_{2A, Est: LB \rightarrow fin} \dot{V}O_2 = \tau \Phi_{2p} \dot{V}O_2$. Los $2C, 7P_{0 \text{ min} \rightarrow 6 \text{ min}} (TD2 = 21.7 \text{ s} \text{ y } \tau 2 = 28.7 \text{ s})$, $2C, 7P_{LB \rightarrow 3 \text{ min}} (TD2 = 20 \text{ s} \text{ y } \tau 2 = 23.5 \text{ s})$, $2C, 7P_{LB \rightarrow 6 \text{ min}} (TD2 = 20 \text{ s} \text{ y } \tau 2 = 27.6 \text{ s})$ y $1C, 4P_{0.3333 \rightarrow 3 \text{ min}} (\tau 2 = 20.3 \text{ s}, \Phi_{2p, S})$ ajustaron de modo similar la RT $\dot{V}O_2 M_{OD, Rel}$. Los MAs Est y Fis de la RT total $\dot{V}O_2 M_{OD}$ y su $\tau \Phi_{2A, Fis: LB \rightarrow fin} \dot{V}O_2 M_{OD}$, fueron $2C, 7P_{0 \text{ min} \rightarrow 6 \text{ min}} (\Phi_{2A, Est: LB \rightarrow fin} \text{ y } \Phi_{2A, Fis: LB \rightarrow fin})$ comparados con $3C, 9P$ y $3C, 10P$ (Cuadro 7, Figs. 2 y 3).

Modelación RT $\dot{V}O_2 A_{LTA}$

Los $3C, 9P_{BL \rightarrow 6 \text{ min}} (\Phi_{2A, Est: LB \rightarrow Fin})$, y $3C, 10P_{BL \rightarrow 6 \text{ min}} (\Phi_{2A, Est: LB \rightarrow Fin})$ mostraron MAs Est que $2C, 7P_{BL \rightarrow 6 \text{ min}} (\Phi_{2A, Fis: LB \rightarrow Fin})$ de la RT total $\dot{V}O_2 A_{LTA}$ (Cuadro 7) y la distinción de su $\tau 2$ (Fig. 4).

Cinética de la RT de la $\Phi_2 \dot{V}O_2$

Los mejores ajustes de la RT de la $\Phi_2 \dot{V}O_2$ E submáximo, que permitieron distinguir su cinética se muestran en el cuadro 8 y ésta resultó similar:

- Para la fase dos aislada, las $\tau \Phi_{2A, Est \rightarrow Fis} \dot{V}O_2 M_{OD, Abs} = 23.9 \pm 11 \text{ s}$ y $\tau \Phi_{2A, Est \rightarrow Fis} \dot{V}O_2 M_{OD, Rel} = 28.1 \pm 11 \text{ s}$ ($\tau \Phi_{2A} \dot{V}O_2 M_{OD} = 26 \pm 11 \text{ s}$).

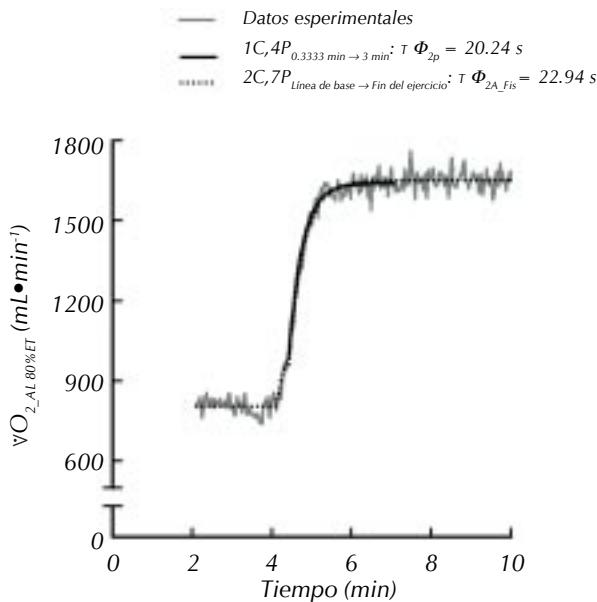


Figura 3. Curso temporal de la $\dot{V}O_2$ durante la respuesta transitoria al ejercicio de intensidad moderada (80% $\dot{V}_E T$ de carga relativa). El mejor ajuste dentro de la fase dos postulada de la $\dot{V}O_2$ la hizo el modelo de conveniencia 1C,4P_{0.3333 min ejercicio → 3 min ejercicio} (Φ_{2p}). El mejor ajuste fisiológico (Fis) para la fase dos aislada (Φ_{2A_Fis}) de la $\dot{V}O_2$ la hizo el modelo 2C,7P_{Línea de base → Fin}. Las estimaciones del tiempo requerido para lograr 63% de la respuesta (amplitud) total o para acercarse dentro de 37% de la amplitud final de una respuesta exponencial de la Φ_2 son $\tau\Phi_{2p}$; $\tau\Phi_{2_Est y Fis}$; $\dot{V}_E T$, umbral ventilatorio.

- 2) Para la fase dos postulada, las $\tau\Phi_{2p} \dot{V}O_2 M_{OD} \text{Abs} = 22.8 \pm 8$ s, $\tau\Phi_{2p} \dot{V}O_2 M_{OD} \text{Rel} = 20.3 \pm 3$ s, y $\tau\Phi_{2p} \dot{V}O_2 A_{LTA} \text{Rel} = 30.9 \pm 7$ s ($\tau\Phi_{2p} \dot{V}O_2$ E submáximo = 25 ± 8 s).
- 3) Y como $\tau\Phi_{2A} \dot{V}O_2 M_{OD}$, $\tau\Phi_{2A_Fis} \dot{V}O_2 A_{LTA} \text{Rel}$ (28.1 ± 19 s) y $\tau\Phi_{2p} \dot{V}O_2$ E submáximo también fueron similares; la cinética general de la RT $\Phi_2 \dot{V}O_2$ E submáximo arrojó una $\tau T_{\text{general}} = 25.6 \pm 13$ s.

DISCUSIÓN

Características físicas, pruebas de ejercicio de rampa y de carga constante

Las características físicas, los valores cardiorrespiratorios máximos y de $\dot{V}_E T$ de los voluntarios estuvieron sobre los de aptitud física promedio.^{37,38}

Debido a que la potencia producida fue diferente entre las pruebas submáximas, también lo fueron el $\dot{V}O_2$ del final del E de cada prueba de trabajo constante, el $\dot{V}O_2 \% \dot{V}_E T$, y $W \% \dot{V}_E T$. La $\Delta \dot{V}O_2 / \Delta W_{\text{Intensidad de Trabajo}} M_{OD}$ con

una relación de $13 \text{ mL}^{-1} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, logró un estado estable a los 3 min porque fue un ejercicio menor $\dot{V}_E T$, en el que $\Delta \dot{V}O_2_{(6-3\text{min})} \approx 0$, mientras que A_{LTA} mostró $\dot{V}O_2$ a los 6 min de ejercicio, mayor que $\dot{V}O_2$ a los 3 min de ejercicio, confirmándose que A_{LTA} fue mayor $\dot{V}_E T$ y por ello la $\Delta \dot{V}O_2$ fue positiva.³³ Las pruebas de carga constante fueron también diferentes del $\dot{V}_E T$, porque el $\dot{V}O_2$ del final de las pruebas de carga constante fueron diferentes al $\dot{V}O_2 \dot{V}_E T$; lo que también explica un $\dot{V}O_2 M_{OD} \text{Abs}$ menor al $\dot{V}O_2 M_{OD} \text{Rel}$, y estos $\dot{V}O_2 M_{OD}$ también menores a $\dot{V}O_2 A_{LTA}$ y éste último mayor que $\dot{V}O_2 \dot{V}_E T$.²³ En consecuencia, las potencias M_{OD} fueron menores que la de $\dot{V}_E T$ y ésta última menor que la potencia A_{LTA} ; lo que coincide con el hecho de que estas intensidades de ejercicio submáximo hayan sido diferentes.²³

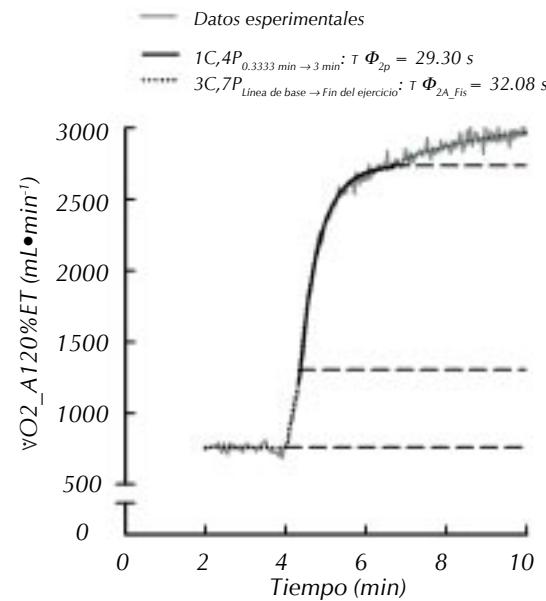


Figura 4. Curso temporal de la $\dot{V}O_2$ durante la respuesta transitoria al ejercicio de intensidad alta (120% $\dot{V}_E T$ de carga relativa). El mejor ajuste estadístico dentro de la fase dos postulada de la $\dot{V}O_2$ la hizo el de conveniencia 1C,4P_{0.3333 min ejercicio → 3 min ejercicio} (Φ_{2p}). El mejor ajuste fisiológico (Fis) para la fase dos aislada (Φ_{2A_Fis}) de la $\dot{V}O_2$ la hizo el modelo 3C,10P_{Línea de base → Fin}. Las estimaciones del tiempo requerido para lograr 63% de la respuesta (amplitud) total o para acercarse dentro de 37% de la amplitud final de una respuesta exponencial de la Φ_2 son $\tau\Phi_{2p}$; $\tau\Phi_{2_Est y Fis}$. Parámetros que describen el curso temporal de estos datos de $\dot{V}O_2$ son: a_0 es la línea de base de $\dot{V}O_2$ (3C modeló una ventana desde los 2 minutos de línea de base, antes de Inicio, hasta Fin del ejercicio); a_1 , a_2 y a_3 (líneas punteadas largas) son los incrementos en la amplitud de la $\dot{V}O_2$ por arriba del valor de la a_0 ; $\tau 1$, $\tau 2$ y $\tau 3$ son las constantes de tiempo; $TD1$, $TD2$ y $TD3$ son los tiempos de retraso; y $A_{\text{Tot}} = a_1 + a_2 + a_3$.

Cuadro 3. Amplitud del análisis cinético de la transición de la VO₂ del estado estable submáximo, determinada como un estimado por los mejores modelos de ajuste matemático exponencial en ocho hombres jóvenes.

Carga de trabajo	Modelo de ajuste (mL•min ⁻¹)	L _{línea de base} (a ₀) (mL•min ⁻¹)	A _{amplitud} Φ ₁ (a ₁) (mL•min ⁻¹)	A _{amplitud} Φ ₂ (a ₂) (mL•min ⁻¹)	A _{amplitud} Φ ₃ (a ₃) (mL•min ⁻¹)	A _{amplitudTotal}
50 Watts	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	[886.88 ± 87.66]	-	287.30 ± 63.32	-	-
	2C,7P _{BL → 6 min}	738.88 ± 78.52	192.95 ± 64.23	245.83 ± 48.77	-	438.85 ± 58.51
80% V _E T	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	[1004.13 ± 181.05]	-	616.90 ± 253.68	-	-
	2C,7P _{BL → 6 min}	737.59 ± 80.19	384.26 ± 128.74	505.36 ± 164.08	-	889.65 ± 209.45
120% V _E T	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	[1290.18 ± 212.79]	-	1287.86 ± 326.69	-	-
	3C,9P _{BL → 6 min}	735.65 ± 87.35	453.75 ± 134.06	379.75 ± 203.83	77.75 ^a ± 81.01	911.25 ^c ± 194.25
	3C,10P _{BL2 → 6 min}	741.3 ± 76.56	686.12 ± 453.40	1058.59 ± 370.14	437.03 ^b ± 256.11	2181.74 ^d ± 381.53

Los datos son Media ± DE.

a ≠ b (t = 9), c ≠ d (t = 7) (t = 57) Student t_{α0.05}, p < 0.05.

Φ₁, Φ₂ y Φ₃ son las fases 1, 2 y 3 del incremento en VO₂ durante la transición del ejercicio submáximo.

BL → 6 min ventana transitoria de ajuste desde una línea de base de dos minutos hasta el final del ejercicio. a₀ representa la línea de base de VO₂ previo a la amplitud de transición del ejercicio submáximo. Para los modelos 1C la a₀ entre paréntesis es la VO₂ correspondiente a 0.3333 min (20 s) del ejercicio de transición y así representa una línea de base «virtual».

VO₂, A_{amplitudTotal} del Modelo 2C = a₁ + a₂; A_{amplitudTotal} del Modelo 3C = a₁ + a₂ + a₃. Los VO₂ (mL•min⁻¹) reales del final del ejercicio fueron 1182 ± 87 los 50 Watts, 1632 ± 213 para 80%VET y 2716 ± 380 para 120%VET, calculados como la media de VO₂ de los 15 s finales de carga de trabajo constante.

Modelación matemática. Modelación RT VO₂ ejercicio submáximo

Los datos de la Φ_{2p} VO₂ y su cinética distinguidos por 1C,4P_{0.3333 min → 3 min} se explican porque este modelo ajusta solamente con una FME, dentro de la RT Φ_{2p} VO₂ del E submáximo (Φ_{2p} VO₂ E submáximo).^{1,5,19 35,39,40} Su ventana de ajuste pequeña dentro de la duración e incremento exponencial de la Φ₂ VO₂ y su simplicidad, explican la “superioridad” de 1C,4P_{0.3333 → 3 min} respecto a 2C y 3C para ajustar la Φ₂ VO₂ de la RT del E submáximo; sin embargo, esta Φ_{2p} VO₂ E submáximo no aplica estadística ni fisiológicamente respecto a la fase dos aislada (Φ_{2A} VO₂) E submáximo, excepto para el valor numérico de la T2 (T Φ_{2p} VO₂ ≈ T Φ_{2A} VO₂) en forma de un parámetro cinético de conveniencia. Debido a que 1C,3P y 1C,4P no distinguen las tres fases de la RT VO₂ del conjunto total de datos, entonces se prefieren 2C y 3C, para ajustar la RT total VO₂ M_{OD} y A_{LTA} respectivamente, ya que 2C y 3C aislan la Φ₂ VO₂

(Φ_{2A} VO₂ E submáximo) de entre las tres fases de la RT total VO₂ E submáximo.^{2,40-42}

Modelación RT VO₂ M_{OD}

El que la Φ_{2A} VO₂ haya sido Est mejor ajustada por 2C,7P_{min → 6 min} (Φ_{2A_Est} VO₂) mientras que 2C,7P_{LB → 6 min} sólo lo hizo desde el punto de vista Fis (Φ_{2A_Fis} VO₂) dentro de la RT total VO₂ M_{OD}, demuestra la importancia de contar con una línea de base adecuada, para incrementar la superioridad de ajuste Est y Fis de un MME y obtener una Φ_{2A_Est & Fis} VO₂ M_{OD}.² Por lo mismo, se preferiría a 2C,7P_{LB → 6 min} desde el punto de vista Fis, para M_{OD} (Φ_{2A_LB → Fin} VO₂ M_{OD}) y así distinguir una Φ_{2A_Est & Fis} VO₂ M_{OD}. Asimismo, 2C,7P distinguió Est mejor la Φ₂ de la RT total VO₂ M_{OD} (Φ_{2A_Est: Inicio → Final del ejercicio} VO₂) o Fis (Φ_{2A_Fis: Línea de base → Final del ejercicio} VO₂), porque 2C,7P diferencia con doble función exponencial, las tres fases de la RT total VO₂ M_{OD}, permitió distinguir una Φ_{2A_Fis o Est: Línea de base o Inicio → Final del ejercicio} VO₂ M_{OD}¹ y obtener una sola Φ_{2A} VO₂ M_{OD} promedio.

Cuadro 4. Parámetros del análisis cinético de la $\dot{V}O_2$ durante la transición del estado estable del ejercicio submáximo, estimados por los mejores modelos de ajuste matemático exponencial en ocho hombres jóvenes.

Carga de trabajo	Modelo de Ajuste	Φ_1 TD1 (s)	Φ_2 TD2 (s)	Φ_3 TD3 (s)	Φ_1 τ_1 (s)	Φ_2 τ_2 (s)	Φ_3 τ_3 (s)	TRM _{exp} (s)	RSS ($\times 10^5$)	MSE	Tipo de Ajuste (E _{st} , F _{is})
50 Watts	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	-	[3.67 ± 5.95]	-	-	22.88 ± 7.75	-	-	2.10 ± 0.42	1348 ± 273	Φ_2 p
	2C,7P _{BL → 6 min}	1.06 ± 3.83	25.45 ^a ± 5.57	-	15.70 ± 5.67	23.21 ± 12.10	-	34.93 ± 5.51	5.22 ± 2.21	1117 ± 488	F _{is} Φ_2
	80% \dot{V}_E T	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	-	[1.80 ± 4.82]	-	20.28 ± 3.31	-	-	3.18 ± 1.19	2041 ± 759	Φ_2 p
	2C,7P _{BL → 6 min}	-1.29 ± 2.64	19.98 ^b ± 1.89	-	15.90 ± 3.81	27.58 ± 9.45	-	33.48 ± 6.94	10.20 ± 3.74	2217 ± 916	F _{is} Φ_2
120% \dot{V}_E T	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	-	[-0.26 ± 6.11]	-	-	30.93 ± 7.11	-	-	13.36 ± 15.02	8564 ± 9629	Φ_2 p
	3C,9P _{BL → 6 min}	-1.44 ± 3.24	23.36 ± 4.89	23.36 ± 4.89	20.90 ± 5.08	17.36 ± 4.92	163.89 ± 6.65	43.64 ^c ± 15.83	10.38 ± 4.42	2202 ± 938	*E _{st} Φ_2
	3C,10P _{BL2 → 6 min}	-0.53 ± 5.04	19.29 ± 4.14	104.68 ± 59.03	20.10 ± 10.91	26.22 ± 10.15	182.67 ± 81.49	92.32 ^d ± 41.03	38.91 ± 35.74	6805 ± 5972	F _{is} Φ_2

Los datos son Media \pm DE.

Φ_1 , Φ_2 y Φ_3 son las fases 1, 2 y 3 del incremento en $\dot{V}O_2$ durante la transición del ejercicio submáximo. TD: tiempo de retraso; τ : constante de tiempo; MRT_{exp}: Tiempo medio de respuesta exponencial; RSS: suma de regresión de los cuadrados (desviaciones explicadas desde la media cuadrada no lineal) está expresado como RSS $\times 10^5$; MSE: suma de error de los cuadrados (las desviaciones internas que modela el cuadrado de la media). Para los modelos 1C el TD2 mostrado entre paréntesis rectangular, representa un TD2 “virtual”. E: mejor ajuste estadístico (Est, basado en la prueba de Fisher). F: mejor ajuste fisiológico (Fis, basado en la diferenciación de la Φ_2 de entre las fases Φ_1 y Φ_3 de la respuesta transitoria de $\dot{V}O_2$). *: sin significado fisiológico.

a \neq b Significativamente ($p < 0.005$) diferentes (Φ_2 TD2_2C,7P_{LB → 6 min}), identificado mediante procedimiento ANOVA- pos hoc Tukey ($F_{valor} = 7.3$, $p < 0.05$).

c \neq d Diferencia significativa entre las medias del mismo parámetro de diferentes modelos con diferentes números de parámetros, identificado mediante procedimiento ANOVA ($H = 40.5$, $p < 0.001$)- método Kruskal-Wallis- Dunn.

TRM_{exp p}: Es el tiempo requerido para lograr aproximadamente 63% de la amplitud total de la respuesta desde una línea de base hasta el valor final de esta ($\dot{V}O_2$).

TRM_{exp—1C} = TD + τ

TRM_{exp—2C} = [a₁ / (a₁ + a₂)] • (TD1 + τ_1) + [a₂ / (a₁ + a₂)] • (TD2 + τ_2)

TRM_{exp—3C} = [a₁ / (a₁ + a₂ + a₃)] • (TD1 + τ_1) + [a₂ / (a₁ + a₂ + a₃)] • (TD2 + τ_2) + [a₃ / (a₁ + a₂ + a₃)] • (TD3 + τ_3)

Modelación RT $\dot{V}O_2 A_{LTA}$

Los 3C,9P y 3C,10P comparados con el MME de dos componentes, permitieron distinguir la Φ_{2A} Est o Fis $\dot{V}O_2$ de entre las tres fases de la morfología de la RT $\dot{V}O_2 A_{LTA}$ tanto con el mejor ajuste Est (Φ_{2A} Est: LB → Fin) hecho por 3C,9P, como Fis (Φ_{2A} Fis: LB → Fin) con 3C,10P, lo que se explica porque el 3C diferencia con triple función exponencial todas las fases de la RT total $\dot{V}O_2 A_{LTA}$ (Φ_{2A} Est o Fis $\dot{V}O_2 A_{LTA}$).² Desafortunadamente, la forma restringida de 3C,10P a TD2 = TD3 (3C,9P) careció de significado Fis debido a la relación estrecha que guardan el TD3 con la Φ_3 $\dot{V}O_2$ por ser mayor a \dot{V}_E T; mientras que el modelo 3C,10P, cumplió con el criterio Fis al distinguir la Φ_{2A} Fis.²

Línea de base → Fin $\dot{V}O_2 A_{LTA}$ ²

Cinética (τ) de la RT de la Φ_2 $\dot{V}O_2$

τ Φ_{2p} $\dot{V}O_2$ E Submáximo. Aunque la intensidad de las tres pruebas de potencia submáxima, aplicadas en este estudio fueron diferentes entre sí, el modelo de ajuste 1C,4P_{0.3333 min → 3 min}, distinguió numéricamente igual la τ Φ_{2p} $\dot{V}O_2$ de Whipp⁵ de la R T del E submáximo; lo que se explica también, porque la RT Φ_2 $\dot{V}O_2$ E submáximo es una respuesta exponencial¹ que al ser modelada dentro de todos los datos experimentales de la Φ_2 , disminuye la probabilidad de una influencia cinética por sus regiones flanqueadas,¹⁴ sobre todo para la Φ_2 $\dot{V}O_2 A_{LTA}$.^{5,14 35}

τ Φ_{2p} $\dot{V}O_2$ M_{op}. Estudiamos al 2C,7P_{LB → 3 min} porque incluyó 2 min de línea de base y observamos que diferenció la Φ_1 $\dot{V}O_2$ de la Φ_2 $\dot{V}O_2$, y optimizó el ajuste en los

datos transitorios de la $\Phi_{2Ap} VO_2 M_{OD}$. No fue extraño que $\tau \Phi_{2Ap} VO_2$ fuera de duración similar a la obtenida con $1C,4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}} M_{OD}$ ($\tau \Phi_{2Ap} VO_2 \approx \tau \Phi_{2p} VO_2$). Debido a esto, $2C,7P_{LB \rightarrow 3 \text{ min}}$ puede usarse en conjunción con $1C,4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}}$ para estimar la $\tau \Phi_{2p} VO_2 M_{OD}$, ya que durante A_{LTA} las fases dos y tres se traslanan.^{14,33} Así, al modelar la RT $\Phi_2 VO_2 M_{OD}$ con $1C,4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}}$ ¹⁸ resulta útil como lo hicimos en este estudio con $1C,4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}}$ y con anterioridad,² para retroalimentar la duración de la $\tau \Phi_{2A-Est \& Fis} VO_2$ con el modelo $2C,7P_{\text{Línea de base o Inicio} \rightarrow \text{Fin} M_{OD}}$.

$\tau \Phi_{2A} VO_2 M_{OD}$. Explicamos el mejor ajuste Est de la $\Phi_2 VO_2$ ($\Phi_{2A-Est} VO_2$) dentro de la RT total $\Phi_2 VO_2 M_{OD}$ por $2C,7P_{0 \text{ min} \rightarrow 6 \text{ min}}$, porque su ventana ajustó un menor número de puntos de referencia experimentales e hizo también el mejor ajuste Fis al igual que $2C,7P_{LB \rightarrow 6 \text{ min}}$, lo que cuantificó $\tau \Phi_{2A-Est} VO_2 M_{OD}$ y $\tau \Phi_{2A-Fis} VO_2 M_{OD}$,^{14,41,18} pero la variabilidad individual y la intensidad de M_{OD} pueden ser responsables de diferencias significativas pequeñas.

$\tau \Phi_{2A} VO_2 A_{LTA}$. Debido a que la RT $\Phi_3 VO_2 A_{LTA}$, no muestra un estado estable²³ ($\Delta VO_2 (6 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}) = +$ en este estudio), sólo $3C,10P$ fue Fis mejor, para ajustar

con una triple función exponencial los datos de la RT total $\Phi_2 VO_2 A_{LTA}$.^{1,2,33,39} Sin embargo, como en este estudio estabamos interesados solamente en $\Phi_{2p} VO_2$ y $\Phi_{2A} VO_2$ de la $\Phi_2 VO_2$ por su aplicación en el área biomédica,³² entonces $3C,10P_{LB \rightarrow 6 \text{ min}}$ sustentó el criterio Fis para distinguir la cinética de la RT $\Phi_2 VO_2 A_{LTA}$, puesto que el valor numérico de $\tau \Phi_{2A-Fis} VO_2 A_{LTA}$ fue similar al de $\tau \Phi_{2p-Est} VO_2 A_{LTA}$ obtenido con $1C,4P_{0.3333 \text{ min} \rightarrow 3 \text{ min}}$. Estos $2C,7P$ y $3C,10P$ con el mejor ajuste de la RT $\Phi_{2A} VO_2$ E submáximo, mostraron más dependencia cercana implicada en la naturaleza de esta respuesta, probablemente porque hay una relación muy estrecha entre la $\tau \Phi_2 VO_2$ (cinética) de la respuesta al E submáximo y la cinética del metabolismo energético a nivel periférico en términos de por ejemplo, τVO_2 consumo y τ del fosfato de creatina (causa) y $\tau \Phi_2 VO_2$ captación (efecto).^{26,43,44} No confirmamos un valor numérico similar de $\tau \Phi_2 VO_2$ estimado por los 11 MMEs, pero sí se confirmó para MMEs con el mejor ajuste Est, Fis o ambos, evaluados en este estudio.

Por último, queda para un trabajo posterior si, ¿son estos hallazgos válidos en adultos mayores para compararlos cinéticamente con aquellos de personas jóvenes?

Cuadro 5. Suma de regresión de los cuadrados y suma de error de los cuadrados del análisis cinético de VO_2 durante la transición del estado estable del ejercicio submáximo, estimados mediante once modelos de ajuste matemático exponencial en ocho hombres jóvenes.

Modelo de Ajuste	Intensidad del ejercicio					
	Moderada (50 Watts)		Moderada (80% $\dot{V}_E T$)		Alta (120% $\dot{V}_E T$)	
	RSS ($\times 10^5$)	MSE	RSS ($\times 10^5$)	MSE	RSS ($\times 10^5$)	MSE
1C,4P _{0.3333 min → 3 min}	2.10 ± 0.42	1348 ± 273	3.18 ± 1.19	2041 ± 759	13.36 ± 15.02	8564 ± 9629
1C,4P _{0.3333 min → 6 min}	3.84 ± 1.38	1142 ± 412	7.93 ± 3.37	2358 ± 1001	40.09 ± 48.07	11929 ± 14308
1C,3P _{BL → 6 min}	6.24 ± 2.30	1326 ± 525	12.39 ± 4.16	2687 ± 997	55.78 ± 63.42	11794 ± 13310
1C,4P _{0 min → 6 min}	4.70 ± 1.18	1319 ± 331	9.23 ± 3.52	2590 ± 985	45.65 ± 53.23	12822 ± 14956
1C,4P _{BL → 6 min}	5.20 ± 2.89	1226 ± 498	11.10 ± 3.53	2415 ± 877	52.61 ± 62.83	11130 ± 13190
2C,7P _{0 min → 6 min}	4.52 ± 1.27	1280 ± 361	8.44 ± 3.41	2388 ± 963	37.46 ± 55.41	10610 ± 15700
2C,7P _{BL → 3 min}	3.22 ± 1.31	1134 ± 461	4.75 ± 1.61	1752 ± 728	22.14 ± 27.96	7661 ± 9544
2C,7P _{BL → 6 min}	5.22 ± 2.21	1117 ± 488	10.20 ± 3.74	2217 ± 916	46.43 ± 61.48	9878 ± 12988
3C,9P _{0 min → 6 min}	4.57 ± 1.32	1300 ± 374	8.57 ± 3.53	2439 ± 1002	15.54 ± 4.67	4426 ± 1329
3C,9P _{BL → 6 min}	-	-	-	-	10.38 ± 4.42	2202 ± 938
3C,10P _{BL → 6 min}	-	-	-	-	38.91 ± 35.74	6805 ± 5972

Los datos son Media ± DE.

RSS: Suma de regresión de los cuadrados y está expresado como RSS $\times 10^5$.

MSE: Suma de error de los cuadrados.

1C, 2C, y 3C son modelos matemáticos exponenciales de uno, dos y tres componentes; 3P: tres parámetros; 4P: cuatro parámetros; 7P: siete parámetros; 9P: nueve parámetros; 10P: diez parámetros. LB: Línea de base de 2 min. \rightarrow : Periodo de tiempo de la ventana transitoria de ajuste.



Cuadro 6. Permutaciones de un modelo matemático exponencial de un componente tomando dos de ellos a la vez y su evaluación del mejor ajuste estadístico de la respuesta transitoria de $\dot{V}O_2$ del ejercicio submáximo en ocho hombres jóvenes.

No ^a	(S)	(C)	Intensidad del ejercicio					
			Moderada (50 Watts)		Moderada (80% V_E)		Alta (120% V_E)	
			F_{RSS}	F_{MSE}	F_{RSS}	F_{MSE}	F_{RSS}	F_{MSE}
1	1C,3P _{BL → 6 min} ^A	1C,4P _{BL → 6 min} ^B	651*,C	-	55*,C	-	46*,C	-
2	1C,3P _{BL → 6 min}	1C,4P _{0 min → 6 min} ^C	-	0.06,S	-	0.19,S	-	0.19,S
3	1C,3P _{BL → 6 min}	1C,4P _{0.3333min → 6 min} ^D	-	0.42,S	-	0.45,S	-	0.07,S
4	1C,3P _{BL → 6 min}	1C,4P _{0.3333min → 3 min} ^E	-	0.01,S	-	0.17,S	-	0.19,S
5	1C,4P _{0.3333min → 3min}	1C,4P _{0.3333min → 6 min}	-	0.60,S	-	0.21,S	-	0.47,S
6	1C,4P _{0.3333min → 3min}	1C,4P _{0min → 6 min}	-	0.11,S	-	0.36,S	-	0.57,S
7	1C,4P _{0.3333min → 3min}	1C,4P _{BL → 6 min}	-	0.37,S	-	0.21,S	-	0.30,S
8	1C,4P _{0.3333min → 6min}	1C,4P _{0min → 6 min}	-	2.68*,S	-	1.67*,C	-	1.51*,C
9	1C,4P _{0.3333min → 6min}	1C,4P _{BL → 6 min}	-	0.16,S	-	0.09,S	-	0.24,S
10	1C,4P _{0 min → 6 min}	1C,4P _{BL → 6 min}	-	0.60,S	-	0.32,S	-	0.68,S

A a E: Cinco modelos matemáticos.

a: El número de permutaciones circulares ($nP^r x$) para las comparaciones entre modelos (No.). Fue calculada según Zar (1996): $nP^r x = n! / [(n-x)!x]$; donde $nP^r x =$ Número de formas diferentes de arreglar dos modelos matemáticos a la vez ($x = 2$) de n ($n = 5$) de ellos en “arreglo” circular; en este caso, $5P^r 2 = ((5!)) / ((5-2)! * 2) = 10$, permutaciones.

b: El mejor modelo matemático exponencial de ajuste estadístico fue evaluado usando los valores de la suma de regresión de los cuadrados (RSS valores) en modelos que ajustan el mismo número de datos de puntos de referencia experimental o la suma de error de los cuadrados (MSE valores) en modelos que ajustan un número diferente de datos de puntos de referencia experimental, mediante la prueba de Fisher (F_{valor}) a 0.05 de nivel de significancia* y α : $F_{tabulado} 0.05 (1\alpha) = 1.15$ (Motulsky y Ransnas, 1987; Zar, 1996). Si $F_{calculada} > F_{tabulada}$ entonces el modelo $C_{complejo}$ ajusta mejor; de lo contrario, si $F_{calculada} < F_{tabulada}$ entonces el modelo S_{simple} ajusta mejor.

LB: Línea de base de 2 min.

→: Período de tiempo de la ventana transitoria de ajuste.

CONCLUSIONES

El 1C,4P_{inicio fase dos postulada → fin fase dos postulada'} modeló dentro de la RT $\Phi_{2p} \dot{V}O_2$ E submáximo y permitió cuantificar convenientemente su cinética.

El 2C,7P_{Línea de base, Inicio → Fin Ejercicio} M_{OD} , modeló fisiológica o estadísticamente mejor con su segundo término exponencial la RT $\Phi_2 \dot{V}O_2$, aislando (RT $\Phi_{2,A: Fis o Est} \dot{V}O_2$) de las fases uno y tres de $\dot{V}O_2$, y permitiendo cuantificar τ RT $\Phi_{2,A: Fis o Est} \dot{V}O_2 M_{OD}$.

El 3C,10P_{Línea de base → Fin Ejercicio} A_{LTA} , modeló Fis mejor, con su segundo término exponencial, dicha RT $\Phi_2 \dot{V}O_2$, aislando (RT $\Phi_{2,A: Fis} \dot{V}O_2$) de las $\Phi_1 \dot{V}O_2$ y $\Phi_3 \dot{V}O_2$, y permitiendo cuantificar τ RT $\Phi_{2,A: Fis} \dot{V}O_2 A_{LTA}$. Esta mejor modelación matemática de la fase dos de la RT $\dot{V}O_2$ del ejercicio submáximo tuvo una cinética similar: τ RT $\Phi_{2,A: Fis} \dot{V}O_2$ E submáximo = τ RT $\Phi_{2,A: Fis o Est} \dot{V}O_2 M_{OD}$ = τ RT $\Phi_{2,A: Fis} \dot{V}O_2 A_{LTA}$ = τ General $\dot{V}O_2$ en hombres jóvenes.

Los mejores modelos matemáticos exponenciales fueron los que aislaron y distinguieron la cinética de la fase dos de entre la respuesta transitoria total de $\dot{V}O_2$ del ejercicio submáximo (2C,7P_{Línea de base, Inicio → Fin Ejercicio} M_{OD} y 3C,10P_{Línea de base → Fin Ejercicio} A_{LTA}), de voluntarios masculinos jóvenes y sanos.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestra gratitud a todos los voluntarios que participaron en este estudio y a Brad Hansen por su excelente asistencia técnica. El Canadian Centre for Activity Ageing es Afiliado con la School of Kinesiology, The University of Western Ontario and The Lawson Research Institute of St. Joseph's Health Centre. Este trabajo fue apoyado por The Natural Sciences and Engineering Council, Canada. Javier Padilla Pérez fue apoyado por la Escuela Superior de Medicina, COFAA-EDD-CGEPI-COTEPABE, Instituto Politécnico Nacional, CONACyT, México.

Cuadro 7. Permutaciones de modelos matemáticos exponenciales de uno, dos y tres componentes tomando dos de ellos a la vez y su evaluación del mejor ajuste estadístico, de la respuesta transitoria de VO₂ del ejercicio submáximo en ocho hombres jóvenes.

No ^a	Modelo de ajuste “Simple” versus “Complejo” (S) (C)	Intensidad del ejercicio:						
		Moderada (50 Watts)		Moderada (80% V _E T)		Alta (120% V _E T)		
		F _{RSS}	F _{MSE}	F _{valor} Calculado ^b F _{RSS}	F _{MSE}	F _{RSS}	F _{MSE}	
1 Componente versus {2 Componentes, 3 Componentes}:								
1	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	2C,7P _{BL → 3 min}	-	1.87*,C	-	0.44,S	-	0.53,S
2	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	2C,7P _{BL → 6 min}	-	1.39*,C	-	1.07,S	-	0.02,S
3	1C,4P _{0.3333 → 3 min}	3C,9P _{0min → 6 min}	-	1.00,S	-	1.19,S	-	0.22,S
4	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	3C,9P _{BL → 6 min}	-	-	-	-	-	4.52*,C
5	1C,4P _{0.3333min → 3 min}	3C,10P _{BL → 6 min}	-	-	-	-	-	0.30,S
2 Componentes versus 2 Componentes:								
1	2C,7P _{BL → 3 min}	2C,7P _{0min → 6 min}	-	0.78,S	-	1.55*,C	-	1.05,S
2	2C,7P _{BL → 3 min}	2C,7P _{BL → 6 min}	-	0.12,S	-	0.54,S	-	0.53,S
3	2C,7P _{0min → 6 min}	2C,7P _{BL → 6 min}	-	0.91,S	-	0.35,S	-	0.02,S
2 Componentes versus 3 Componentes:								
1	2C,7P _{BL2 → 3 min}	3C,9P _{0 → 6 min}	-	0.90,C	-	1.58*,C	-	0.87,S
2	2C,7P _{0 → 6 min}	3C,9P _{0 → 6 min}	1.54*,C	-	6.23*C	-	12*,C	-
3	2C,7P _{BL2 → 6 min}	3C,9P _{0 → 6 min}	-	0.48,S	-	-	-	0.29,S
4	2C,7P _{BL2 → 3 min}	3C,9P _{BL2 → 6 min}	-	-	-	-	-	1.57*,C
5	2C,7P _{0 → 6 min}	3C,9P _{BL2 → 6 min}	-	-	-	-	-	15*,C
6	2C,7P _{BL2 → 6 min}	3C,9P _{BL2 → 6 min}	-	-	-	-	825*,C	-
7	2C,7P _{BL2 → 3 min}	3C,10P _{BL2 → 6 min}	-	-	-	-	-	0.10,S
8	2C,7P _{0 → 6 min}	3C,10P _{BL2 → 6 min}	-	-	-	-	-	0.75,S
9	2C,7P _{BL2 → 6 min}	3C,10P _{BL2 → 6 min}	-	-	-	-	31*,C	-
3 Componentes versus 3 Componentes:								
1	3C,9P _{0 → 6 min}	3C,9P _{BL2 → 6 min}	-	-	-	-	-	0.78,S
2	3C,9P _{0 → 6 min}	3C,10P _{BL2 → 6 min}	-	-	-	-	-	0.51,S
3	3C,9P _{BL2 → 6 min}	3C,10P _{BL2 → 6 min}	-	-	-	-	0.22,S	-

a: El número de permutaciones circulares (nP[’]x) para los modelos comparados (No.) Fue calculado segun Zar (1996).

b: El mejor ajuste estadístico del modelo matemático exponencial fue evaluado, usando la suma de regresión de los cuadrados (RSS valores) para modelos que ajustan el mismo número de datos de puntos de referencia experimental o la suma de error de los cuadrados (MSE valores) para modelos que ajustan un número diferente de datos de puntos de referencia experimental mediante la prueba de Fisher (F_{valor}, a un nivel de significancia de 0.05 1α:F_{tabulada} 0.05, 1α = 1.15) (Motulsky and Ransnas, 1987; Zar, 1996). Si F_{calculada} > F_{tabulada} entonces el modelo “complejo” (C) ajusta mejor; de lo contrario, si F_{calculada} < F_{tabulada} entonces el modelo “simple” (S) ajusta mejor. 1C, 2C, y 3C son los modelos matemáticos exponenciales de un componente, dos componentes y tres componentes; 3P: tres parámetros; 4P: cuatro parámetros; 7P: siete parámetros; 9P: nueve parámetros; 10P: diez parámetros. LB: Línea de base. →: Periodo de tiempo de la ventana transitoria de ajuste.

REFERENCIAS

1. Lamarra N. Ventilatory control, cardiac output, and gas-exchange dynamics during exercise transients in man. Ph D Thesis Dissertation, Los Angeles, California, USA: University of California; 1982.
2. Padilla PJ. Cardiorespiratory and acid-base control kinetics during submaximal exercise in young and old men. Unpublished data, Ontario, Canada: The University of Western Ontario, London; 1997.
3. Evans M, Hastings N, Peacock B. Statistical Distributions, 2nd Ed. Toronto: John Wiley and Sons, Inc., A Wiley-Interscience Publication; 1993.

Cuadro 8. Modelos matemáticos exponenciales con el mejor ajuste fisiológico y estadístico, que permitieron identificar la fase dos y su cinética transitoria de la $\dot{V}O_2$ durante el ejercicio submáximo (moderado e intenso) en ocho hombres jóvenes.

Modelo matemático exponencial	Modelo de ajuste	$T \Phi_2 \dot{V}O_2$
$\dot{V}O_2(t) = a_{0(virtual)} + a_1 \cdot [1 - e^{-(t - TD2)/\tau_2}]$	Ejercicio submáximo 1C, 4P _{0.3333min → 3 min Ejercicio}	$T \Phi_2$ postulada
$\dot{V}O_2(t) = a_0 + a_1 \cdot [1 - e^{-(t - TD1)/\tau_1}] + a_2 \cdot [1 - e^{-(t - TD2)/\tau_2}]$	Ejercicio moderado (50 Watts, 80% $\dot{V}_E T$) 2C, 7P _{Inicio → Fin del Ejercicio} 2C, 7P _{LíneaBase → Fin del Ejercicio} $\therefore \Phi_{2A_Est \& Fis} \dot{V}O_2(t) = a_0 + a_2 \cdot [1 - e^{-(t - TD2)/\tau_2}]$	“ Φ_1 ”, $T \Phi_{2A_Est \& Fis}$, Φ_3 “ Φ_1 ”, $T \Phi_{2A_Fis}$, Φ_3
$\dot{V}O_2(t) = a_0 + a_1 \cdot [1 - e^{-(t - TD1)/\tau_1}] + a_2 \cdot [1 - e^{-(t - TD2)/\tau_2}] + a_3 \cdot [1 - e^{-(t - TD3)/\tau_3}]$	Ejercicio intenso (120% $\dot{V}_E T$) 3C, 10P _{Inicio Fin → del Ejercicio} $\therefore \Phi_{2A_Fis} \dot{V}O_2(t) = a_0 + a_2 \cdot [1 - e^{-(t - TD2)/\tau_2}]$	“ Φ_1 ”, $T \Phi_{2A_Fis}$, F_3

$\dot{V}O_2$ transitoria del ejercicio: Respuesta corporal de captación pulmonar de O_2 ($\dot{V}O_2$) desde el inicio hasta final del ejercicio debido a la aplicación de una función ergométrica forzada.

$\dot{V}_E T$: Umbral ventilatorio. Est: Significado estadístico basado en la prueba de Fisher. Fis: Significado fisiológico basado en la diferenciación de las fases y el valor numérico de sus parámetros temporales estimados, de la respuesta transitoria de la $\dot{V}O_2$ conforme a la intensidad del ejercicio modelada.

$\dot{V}O_2(t)$: Cambio de masa de $\dot{V}O_2$ por unidad de tiempo ($d\dot{V}O_2/dt$), mL•min⁻¹; TD: tiempo de retraso, s; a_0 : línea de base de la $\dot{V}O_2$ al inicio del ejercicio ajustado por un modelo; a : amplitud de la $\dot{V}O_2$ (mL) comprendida desde a_0 hasta la $\dot{V}O_2$ requerida para fase uno (a_1), para la fase dos (a_2) y para la fase tres (a_3) (Amplitud total = $a_1 + a_2 + a_3$, mL); $1 - e^{-(t/\tau)}$: distribución exponencial negativa (Evans, Hasting y Peacock, 1993); $e^{-(t/\tau)}$: factor de decaimiento con la constante de tiempo τ (s) para un incremento exponencial (respuesta transitoria de la $\dot{V}O_2$ al ejercicio); t : tiempo en el que la respuesta transitoria de la $\dot{V}O_2$ al ejercicio decae gradualmente (exponencialmente), cuando $t = \tau$ significa el tiempo necesario para que la respuesta transitoria de la $\dot{V}O_2$ al ejercicio decaiga hasta la parte e^{-1} ($e^{-1} = 1/2.71828 = 0.3678$) de su valor original, de este modo, $\tau = 1 - 0.3678 = 0.63$, y $e = 2.71828 = [(1 + n)^1]^n$, $n \approx 10$ y ‘ e ’ es incommensurable con 1.

Un componen (1C), TD1. Dos componentes (2C), TD1 y TD2. Tres componentes (3C), 2C y TD3. 4P: cuatro parámetros (a_0 , a_2 , TD2, τ_2); 7P: siete parámetros (a_0 , a_1 , a_2 , TD1, TD2, τ_1 , τ_2); 10P: diez parámetros (7P, a_3 , TD3, T3).

La “ Φ_1 ” significa que aunque el modelo matemático exponencial ajustó los datos experimentales totales, esta fase (Φ) uno no tiene un comportamiento exponencial, como probablemente tampoco lo tiene la fase tres (“ Φ_3 ”).

- Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K. Respiratory markers of the anaerobic threshold. *Adv Cardiol* 1986; 35: 47-64.
- Whipp BJ. Dynamics of pulmonary gas exchange. *Circ* 1987; 76(Suppl VI): VI-18-VI-28.
- Barstow TJ, Buchthal S, Zanconate S, Cooper DM. Muscle energetics and pulmonary oxygen uptake kinetics during moderate exercise. *J Appl Physiol* 1994; 77: 1742-9.
- Petrella RJ, Cunningham DA, Paterson DH. $\dot{V}O_2$ on-transients kinetics with a centrally acting calcium channel blocker. *Adv Exp Med Biol* 1995; 393: 201-5.
- Chilibeck PD, Paterson DH, Petrella RJ, Cunningham DA. The influence of age and cardiorespiratory fitness on kinetics of oxygen uptake. *Can J Appl Physiol* 1996; 21: 185-96.
- Grassi B. Skeletal muscle $\dot{V}O_2$ on-kinetics: set by $\dot{V}O_2$ delivery or by $\dot{V}O_2$ utilization? New insights into an old issue. *Med Sci Sports Exerc* 2000; 32(1): 108-16.
- Hughson RL, Cochrane JE, Butler GC. Faster $\dot{V}O_2$ uptake kinetics at onset of supine exercise with than without lower body negative pressure. *J Appl Physiol* 1993; 75: 1962-7.
- Yoshida T, Yamamoto K, Udo M. Relationship between cardiac output and oxygen uptake at the onset of exercise. *Eur J Appl Physiol* 1993; 66: 155-60.
- Barstow TJ, Jones AM, Ynugen PH, Casaburi R. Influence of muscle fibre type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *J Appl Physiol* 1996; 81: 1642-50.
- Scheuermann BW, Hoelting BD, Noble ML, Barstow T. The slow component of $\dot{V}O_2$ uptake is not accompanied by changes in muscle EMG during repeated bouts of heavy exercise in humans. *J Physiol* 2001; 531(1): 245-56.
- Paterson DH, Whipp BJ. Assymetries of oxygen uptake transients at the on- and off-set of heavy exercise in humans. *J Physiol* 1991; 443: 575-86.
- Scheuermann BW, Kowalchuk JM, Paterson DH, Cunningham DA. $\dot{V}O_2$ uptake kinetics after acetazolamide administration during moderate- and heavy- intensity exercise. *J Appl Physiol* 1998; 85: 1384-93.
- MacDonald MJ, Pedersen PK, Hughson RL. Aceleration of $\dot{V}O_2$ kinetics in heavy submaximal exercise by

hyperoxia and prior high- intensity exercise. *J Appl Physiol* 1997; 83: 1318-25.

17. Huges JMB. Diffusive gas exchange. In: *Exercise: Pulmonary physiology and pathophysiology*. New York, NY, USA: B.J. Whipp, and K. Wasserman. Marcel Dekker, Inc.; 1991.
18. Whipp BJ, Lamarra N, Davis JA, Wasserman K. Parameters of ventilation and gas exchange dynamics during exercise. *J Appl Physiol* 1982; 52: 1506-13.
19. Bangsbo J. Muscle oxygen uptake during exercise. *Acta Physiol Scand* 2000; 168: 457-64.
20. Delp MD. Control of skeletal muscle perfusion at the onset of dynamic exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31(7): 1011-8.
21. Shoemaker JK, Hughson RL. Adaptation of blood flow during the rest to work transition in humans. *Med Sci Sports Exerc* 1999; 31(7): 1019-26.
22. Brittain CJ, Rossiter HB, Kowalchuk JM, Whipp BJ. Effect of prior metabolic rate on the kinetics of oxygen uptake during moderate- intensity exercise. *Eur J Appl Physiol* 2001; 86: 125-34.
23. Cunningham DA, Himann JE, Paterson DH, Dickson JR. Gas exchange dynamics with sinusoidal work in young and elderly women. *Resp Physiol* 1993; 91: 43-56.
24. Paterson DH, Cunningham DA, Babcock MA. Oxygen kinetics in the elderly. In: Swanson GD, Grodins FS, Hughson RL (eds.). *Respiratory Control: A Modelling Perspective*. NY, USA: Plenum Press; 1989.
25. MacDonald MJ, Shoemaker JK, Tschakovsky ME, Hughson RL. Alveolar oxygen uptake and femoral artery blood flow dynamics in upright and supine leg exercise in humans. *J Appl Physiol* 1998; 85: 1622-8.
26. Rossiter HB, Ward SA, Kowalchuk JM, Howe FA, Griffiths JR, Whipp BJ. Effects of prior exercise on oxygen uptake and phosphocreatine kinetics during high- intensity knee- extension exercise in humans. *J Physiol* 2001; 537: 291-303.
27. Tschakovsky ME, Hughson RL. Interaction of factors determining oxygen uptake at the onset of exercise. *J Appl Physiol* 1999; 86: 1101-13.
28. Beaver WL, Lamarra N, Wasserman K. Breath-by-breath measurements of true alveolar gas exchange. *J Appl Physiol* 1981; 51: 1662-75.
29. Davis JA, Frank MH, Whipp BJ, Wasserman K. Anaerobic threshold alterations caused by endurance training in middle-aged men. *J Appl Physiol* 1979; 46: 1039-46.
30. Whipp BJ, Davis JA, Torres F, Wasserman K. A test to determine parameters of aerobic function during exercise. *J Appl Physiol* 1981; 50: 217-21.
31. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting the anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* 1986; 60: 2020-7.
32. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY, Whipp BJ. *Principles of exercise testing and interpretation*. Philadelphia, USA: Lea and Febiger; 1987.
33. Whipp BJ. The bioenergetics and gas exchange basis of exercise testing. *Clin Chest Med* 1994; 15: 173-92.
34. Marquardt DW. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *J Soc Induct Appl Math* 1963; 11(2): 431-41.
35. Motulsky HJ, Ransnas LA. Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review. *FASEB J* 1987; 1: 365-74.
36. Zar JH. *Biostatistical Analysis*. 3rd Ed. New Jersey: Prentice Hall, Inc.; 1996.
37. Åstrand PO, Rodahl K. Maximal aerobic power-age and sex. In: *Textbook of Work Physiology. Physiological Bases of Exercise*. NY, USA: McGraw-Hill Co.; 1977.
38. Åstrand I. Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta Physiol Scand* 1960; 49(Suppl. 169).
39. Barstow TJ, Molé PA. Linear and nonlinear characteristics of oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *J Appl Physiol* 1991; 71: 2099-106.
40. Whipp BJ, Wasserman K. Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. *J Appl Physiol* 1972; 33: 351-6.
41. Casaburi R, Barstow TJ, Robinson T, Wasserman K. Influence of work rate on ventilatory and gas exchange kinetics. *J Appl Physiol* 1989; 67: 547-55.
42. Hughson RL, Kowalchuk JM. Kinetics of oxygen uptake for submaximal exercise in hyperoxia, normoxia, and hypoxia. *Can J Appl Physiol* 1995; 20: 198-210.
43. Rossiter HB, Ward SA, Doyle VL, Howe FA, Griffiths JR, Whipp BJ. Inferences from pulmonary O₂ uptake with respect to intramuscular [PCr] kinetics during moderate exercise in humans. *J Physiol* 1999; 518: 921-32.
44. Whipp BJ, Rossiter HB, Ward SA, Avery D, Doyle VL, Howe FA, Griffiths JR. Simultaneous determination of muscle ³¹P and O₂ uptake kinetics during whole body NMR spectroscopy. *J Appl Physiol* 1999; 86: 742-7.

Solicitud de sobretiros:

Javier Padilla Pérez MD, MSc
Fisiología del Ejercicio,
Escuela Superior de Medicina 3º Piso
Instituto Politécnico Nacional,
Casco de Santo Tomás, DMH,
C.P.11340, México, D.F.
Tel.: (55)5729-6300 Ext/Fax: 62733
Correo electrónico: japadillap@ipn.mx