



HEZKUNTZA
ETA KIROL
FAKULTATEA
FACULTAD
DE EDUCACIÓN
Y DEPORTE

FACULTAD DE EDUCACIÓN Y DEPORTE
Grado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte
Curso: 2019-2020

TRABAJO FIN DE GRADO

**ANÁLISIS DEL RENDIMIENTO EN LA CARRERA A PIE: VO_{2max} y
ECONOMÍA DE CARRERA**

AUTOR: ANTUÑANO AGUIAR, Iñaki

DIRECTOR: CÁMARA TOBALINA, JESÚS

Fecha: 8 de Mayo de 2020.

Tabla de Contenidos

1. Introducción.....	3
2. Objetivos.....	5
3. Criterios de búsqueda.....	6
4. Consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}).....	7
○ 4.1 Introducción.....	7
○ 4.2 Medición.....	8
○ 4.3 Parámetros relacionados con el VO_{2max}	14
▪ 4.3.1 Los umbrales ventilatorios.....	14
• 4.3.1.1 Umbral aeróbico (UA).....	14
• 4.3.1.2 Umbral anaeróbico (UAn)	15
▪ 4.3.2 Velocidad máxima aeróbica (VAM).....	17
▪ 4.3.3 Economía de carrera.....	17
5. Economía de carrera (EC).....	19
○ 5.1 Introducción.....	19
○ 5.2 Medición.....	19
○ 5.3 Parámetros que afectan a la economía de carrera.....	20
▪ 5.3.1 Frecuencia y longitud de zancada.....	21
▪ 5.3.2 Leg-stiffness.....	22
6. Conclusiones.....	26
7. Limitaciones.....	26
8. Referencias.....	27

1. INTRODUCCIÓN

La carrera a pie es una práctica deportiva que abarca las carreras de velocidad (60, 100, 200 y 400 metros en pistas), las carreras de media distancia (distancias entre 800 y 3000 metros) y las carreras de larga distancia (5km, 10km, media maratón, maratón y ultra maratón). Además también se realizan carreras populares con distancias específicas, por ejemplo, la Behobia-San Sebastian (20km). Debido a esta amplia variedad existe un gran número de participantes, ya sean populares, amateurs o de élite.

Se han realizado una gran cantidad de estudios, tanto desde el punto de vista del entrenamiento, como del fisiológico y biomecánico, para determinar cuáles son los factores que influyen en el rendimiento, ya sea para poder influir en el mismo o para poder hacer comparaciones entre diferentes grupos de sujetos o entre distintos sujetos de un mismo grupo.

Se observa que en la literatura estos parámetros se clasifican de distintas maneras. Por un lado, a través de la economía de carrera (EC), teniendo en cuenta que los cambios en esta producen cambios en el rendimiento y, por otro, considerando la economía de carrera como un factor fisiológico más.

En el presente trabajo se incluye la economía de carrera en los factores fisiológicos y se dividen los determinantes del rendimiento en 4 grupos: entrenamiento, factores ambientales, factores fisiológicos y factores biomecánicos (Tabla 1).

En las carreras a resistencia el consumo máximo de oxígeno es un factor discriminante. La primera condición para que un atleta pueda obtener buenas marcas y buen rendimiento es que tenga un valor de VO_{2max} alto. Partiendo de esta premisa, una vez que el atleta tenga un elevado VO_{2max} , la segunda condición para alcanzar un mayor rendimiento es mediante una buena economía de carrera, es por esto que el fin de este trabajo es profundizar en estos dos parámetros en vez de exponer todos de una manera superficial.

Los parámetros relacionados con el VO_{2max} que se van a analizar son los umbrales ventilatorios, la velocidad aeróbica máxima y la economía de carrera, ya que son los parámetros que se pueden medir mediante pruebas ergoespirométricas.

Tabla 1. Factores que influyen en el rendimiento.

Entrenamiento	Factores ambientales	Factores fisiológicos	Factores biomecánicos
Resistencia	Altitud	Economía de carrera	Antropometría
Fuerza	Temperatura	Consumo máximo de oxígeno	Leg-stiffness
Velocidad	Aire/Viento	Umbral aeróbico	Flexibilidad
Fase del entrenamiento	Humedad	Umbral anaeróbico	Oscilación vertical del centro de gravedad
Volumen	Pendiente del terreno	Frecuencia cardiaca	Orientación del tronco y de la pelvis
Pliométricos		Velocidad aeróbica máxima	Parámetros de zancada
Intervalos		Masa corporal	Ángulo de zancada
Aclimatación al calor		Edad	Ángulo de las extremidades inferiores
Altura		Raza	Energía elástica almacenada
		Género	Fuerza de reacción del suelo
		Fatiga	Patrón de pisada
		Fibras musculares	
		Factores metabólicos	

2. OBJETIVOS

Los objetivos de esta revisión van a ser los siguientes:

- Determinar cuáles son los parámetros que influyen en el VO_{2max} en la carrera a pie y analizar su relación con el rendimiento.
- Determinar cuáles son los parámetros que influyen en la economía de carrera y analizar su relación con el rendimiento.
- Relacionar los parámetros de zancada con la economía de carrera y cómo influyen en los demás aspectos cinemáticos.
- Relacionar el leg-stiffness con la economía de carrera y el rendimiento.

3. CRITERIOS DE BÚSQUEDA

La búsqueda estratégica ha sido realizada durante los meses de febrero y marzo del 2020 en la base de datos Pubmed. Los artículos escogidos para la revisión han sido mayoritariamente los de habla inglesa, con alguna excepción en la que el texto es de habla castellana.

Ya que esta revisión tiene diferentes objetivos, se han realizado diferentes búsquedas, utilizando los operadores booleanos "and" y "or" junto con las siguientes palabras clave:

"performance", "running", "parameters", "maximal oxygen uptake", "running economy", "stiffness", "step frequency", "stride frequency", "step length" y "stride length".

A la hora de seleccionar los artículos, los criterios de exclusión que se han tenido en cuenta han sido los siguientes: que la muestra de los estudios contuviera más de 5 participantes, que los resultados fueran recogidos con apartados de medición electrónicos y no manuales y que los sujetos fueran o corredores de élite o, en su defecto, que fueran sujetos entrenados.

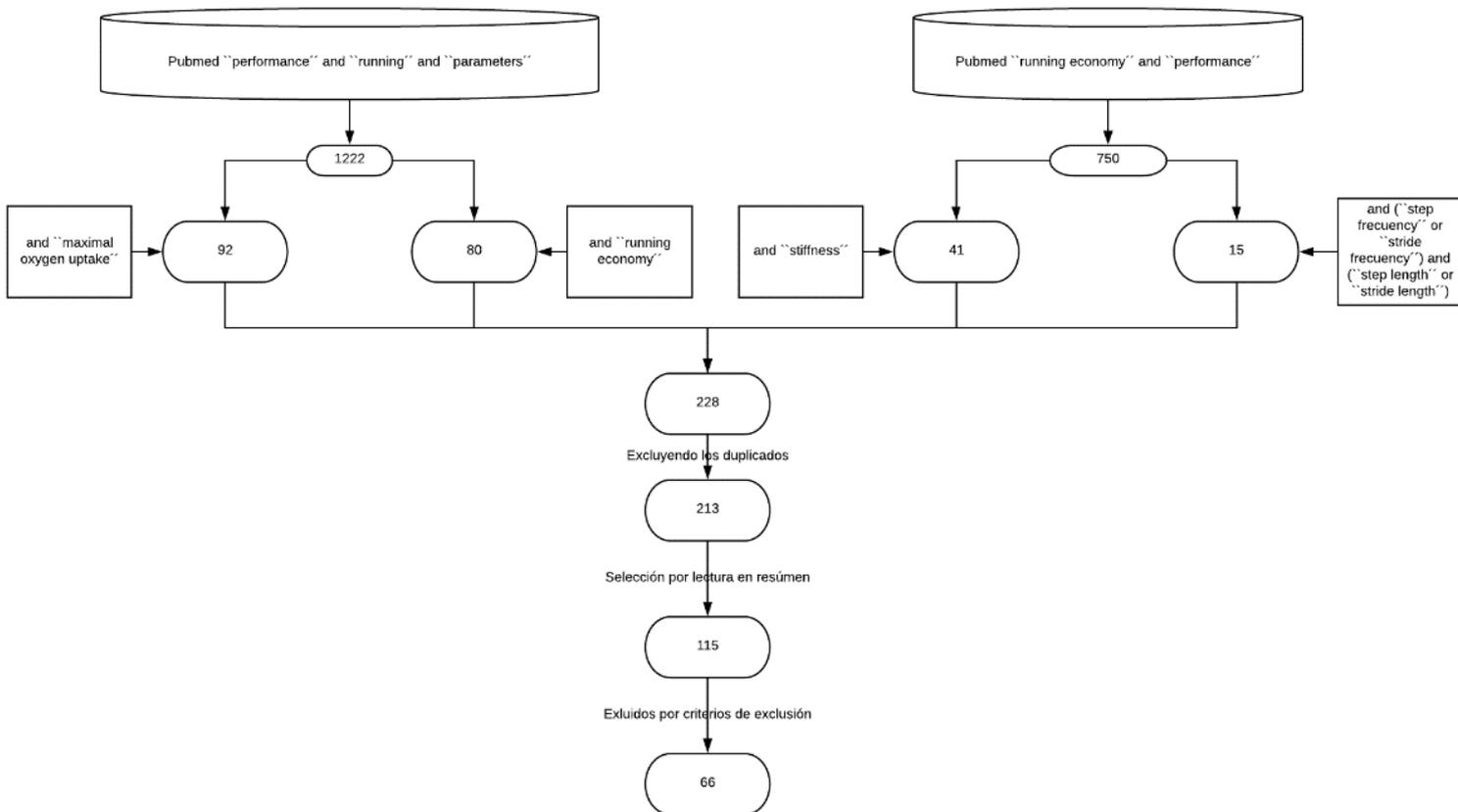


Figura 1. Flujograma criterios de búsqueda.

4. CONSUMO MÁXIMO DE OXÍGENO (VO_{2max})

4.1 Introducción

El consumo de oxígeno (VO_2) es el volumen de oxígeno consumido por unidad de tiempo y el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}) se define tradicionalmente como la tasa máxima a la que el cuerpo puede tomar y usar oxígeno durante el ejercicio (Hill & Lupton, 1923). Otra definición válida del VO_{2max} es el valor de consumo de oxígeno en el que los niveles crecientes de trabajo supra-máximo no logran aumentar aún más el VO_2 (Taylor et al., 1955).

Hill & Lupton, (1923) propusieron que hay un límite superior de VO_{2max} , que hay diferencias interindividuales en esta variable y que el VO_{2max} está limitado por el sistema circulatorio y el sistema respiratorio. Además, demostraron que el consumo de oxígeno se incrementa linealmente con la velocidad de carrera, pero que en algunos sujetos finalmente alcanza un máximo, el cual ningún esfuerzo puede sobrepasarlo. A este máximo hoy en día se le conoce como el VO_2 plateau.

Posteriormente, a finales del siglo pasado, Timothy Noakes criticó el concepto de VO_{2max} de Hill, 1923 (Noakes, 1988). Manteniendo que la ausencia de VO_2 plateau en algunos sujetos es una prueba de que el suministro de oxígeno no es un factor limitante del VO_{2max} .

Este punto de vista no reconoce que el plateau sea la principal prueba de una limitación cardiorrespiratoria. El modelo alternativo que propone es que el rendimiento en resistencia está limitado por factores musculares.

Noakes, (1988) sugiere que los mejores corredores de distancia tienen características musculares que les permiten alcanzar velocidades de carrera más altas, y dado que la velocidad de carrera está relacionada linealmente con el consumo de oxígeno, una consecuencia indirecta de esto es que tendrán valores más altos de VO_{2max} . Esto es exactamente lo contrario de cómo se debe ver la relación entre VO_{2max} y la velocidad de carrera al final de una prueba de ejercicio máxima.

El VO_{2max} generalmente se acepta como la mejor cuantificación del límite funcional del sistema cardiovascular (Rowell, 1974) y se interpreta comúnmente como un índice de aptitud cardiorrespiratoria. Además, está proporcionalmente relacionada con la capacidad aeróbica y al rendimiento.

El VO_{2max} está influenciado por una variedad de factores que incluyen la densidad capilar muscular, la masa de hemoglobina, el volumen sistólico, la actividad enzimática aeróbica y la

composición del tipo de fibra muscular (Coyle, 1999). Aunque se requiere un alto VO_{2max} carreras de distancia, otros factores fisiológicos y de rendimiento son importantes para determinar la capacidad de resistencia (Conley & Krahenbul, 1980). Estos factores dependen de la distancia de la carrera e incluyen el porcentaje de VO_{2max} que un corredor puede soportar sin acumular ácido láctico, la capacidad de utilizar la grasa como combustible a altas tasas de trabajo y, por lo tanto, “recargar” los carbohidratos y correr a ritmo de carrera con un gasto de energía relativamente bajo, es decir, con una buena economía de carrera. La velocidad asociada con el logro de VO_{2max} (vVO_{2max}) y la velocidad al inicio de la acumulación de lactato en sangre también son buenos indicadores del rendimiento de la carrera a distancia (Billat et al, 1999).

Recientemente se ha destacado que existe una considerable heterogeneidad con respecto a la magnitud de la respuesta del VO_{2max} al entrenamiento con ejercicios crónicos (Astorino & Schubert, 2014). De hecho, una amplia variabilidad (-33.2% a +58%) en la respuesta individual de VO_{2max} al entrenamiento físico se ha descrito previamente en la literatura (Bouchard & Rankinen, 2001). Se ha reportado que la edad, el sexo, la raza y el VO₂ inicial no influyen en la heterogeneidad en la respuesta individual de VO_{2max} al entrenamiento físico (Bouchard & Rankinen, 2001). Por el contrario, se ha informado que la genética es responsable del 47% del cambio en VO_{2max} (Bouchard et al., 1999).

Tradicionalmente, se ha venido utilizando casi como el único parámetro fisiológico determinante de las carreras de fondo (Bosquet et al., 2002). Sin embargo, cuando se comparan corredores de alto nivel con valores de VO_{2max} elevados y homogéneos, se ha observado que la correlación del VO_{2max} con el rendimiento es baja (Bosquet et al., 2002) y deja de ser un parámetro discriminativo del nivel de rendimiento.

El VO_{2max} no es un buen predictor del rendimiento en grupos de atletas con una variación interindividual del VO_{2max} pequeña (Jones & Carter, 2000).

El valor del VO_{2max} se pondera en base al peso para poder comparar a diferentes sujetos. En corredores altamente entrenados oscila alrededor de 70 ml x kg⁻¹ x min⁻¹ y en moderadamente entrenados en 60 ml x kg⁻¹ x min⁻¹.

4.2 Medición

Como hemos visto el consumo de oxígeno es el volumen de oxígeno consumido por unidad de tiempo, siendo la unidad ml/min. En cuanto al VO_{2max} se podría utilizar esa misma unidad, sin embargo, a la hora de comparar a diferentes sujetos, se tiene que tener en cuenta

la masas corporal de cada individuo, por lo que se divide el resultado entre la masa corporal, siendo la unidad $ml \times kg^{-1} \times min^{-1}$.

No obstante, en algunos estudios se ha encontrado que el VO_{2max} durante la carrera no aumenta proporcionalmente a la masa corporal, mostrando una relación inversa, lo que significa que los corredores más pesados obtienen valores relativamente más bajos y mejores que los individuos más ligeros (Bergh et al., 1991; Pate et al., 1992). Por lo tanto, parece razonable esperar que las personas ligeras requieran una mayor consumo de oxígeno por kilogramo de masa corporal que las personas más pesadas a una velocidad de carrera determinada, aunque no haya diferencia en factores tales como la habilidad de correr (Bergh et al., 1991).

Así pues, dividir VO_{2max} por la masa corporal puede proporcionar resultados comparativos engañosos e inducir a interpretaciones erróneas cuando se comparan individuos o grupos que difieren en la masa corporal (Pate et al., 1992; Bergh et al., 1991). Además, se podría considerar que los individuos ligeros son menos hábiles para correr que los pesados si el VO_{2max} se expresa en $ml \times kg^{-1} \times min^{-1}$ (Bergh et al., 1992). Por lo tanto, para minimizar la influencia de la masa corporal en el VO_{2max} durante la carrera, algunos autores indican que sería mejor expresar los valores de VO_{2max} en $ml \times kg^{-0,75} \times min^{-1}$ (Bergh et al., 1992; Svedenhag & Sjodin, 1994).

La medición VO_{2max} se puede realizar de manera directa o indirecta. La valoración indirecta del VO_{2max} , son pruebas de campo son adaptables a grupos grandes de sujetos. Además, permiten realizar estimaciones con una utilización de material mínima y sin la necesidad de un laboratorio. En la valoración indirecta, se encuentran el test de Course Navette y el test de Cooper, que se utilizan para predecir la aptitud aeróbica, prediciendo el consumo máximo de oxígeno y el rendimiento.

- Test de Cooper: En su estudio, Cooper (1968), evalúa la correlación entre el VO_{2max} obtenido mediante este test de campo y los datos obtenidos en una cinta de correr, siendo 0.987, que indica una relación muy significativa. En este test se mide la distancia realizada en 12 minutos de carrera continua. A continuación se utiliza la siguiente formula:

$$VO_{2max} (ml \times kg^{-1} \times min^{-1}) = \text{Metros recorridos} * 0.02 - 5.4$$

Entre otros estudios que realizan comprobaciones con distintos tipos de población o comparan diferentes test, el estudio realizado por Grant et al., (1995) el test de Cooper tiene un

coeficiente de correlación de 0.92 respecto a la medición directa de VO_{2max} en una cinta de correr.

Este test también depende de la capacidad anaeróbica, la motivación y la capacidad de correr a un ritmo uniforme durante la prueba.

- Test de Course-Navette: También conocido como test de los 20 metros o 20-MST propuesto por Léger & Lambert, (1982), con un coeficiente de correlación de 0.84 respecto a una previa medición directa del VO_{2max} .

El test trata de correr de un lado a otro en un recorrido de 20 metros, el ritmo se fija mediante señales de audio emitidas en una cinta pregrabada, con la intención de completar el mayor número de etapas posibles. Se anuncia el tiempo cada medio minuto, para ayudar al sujeto a decidir si debe o no intentar o no superar la etapa, que dura 2 minutos. La prueba se detiene cuando el sujeto no puede seguir el ritmo (al estar 3 metros por detrás de la línea de 20 metros a la señal de audio) o cuando siente que no puede seguir la etapa (Léger & Lambert, 1982).

Pallizcka et al., (1987) realizaron un estudio con el objetivo de evaluar la validez del 20-MST como prueba de campo de la capacidad cardiorrespiratoria y como predictor del rendimiento competitivo en un evento de resistencia. Los sujetos realizaron el 20-MST, al de dos días una carrera de 10km y finalmente al de dos semanas una evaluación del VO_{2max} en laboratorio. Los resultados mostraron que el 20-MST es un estimador válido del consumo máximo de oxígeno y del rendimiento de la carrera en 10 km y que podría ser usado como un predictor preciso del rendimiento de la carrera (20MST- VO_{2max} $r=0.93$ //20MST-10km $r=0.93$).

Las pruebas directas son las pruebas maximales graduadas y los protocolos incrementales realizados en una cinta de correr monitorizada. Desde mediados del siglo pasado, se han introducido varios dispositivos electrónicos que incorporan analizadores de gases y una variedad de medidores de flujo integrados con computadoras para producir un análisis dedicado de intercambio de gases respiratorios (RGE).

Se entiende que las empresas que comercializan los diferentes dispositivos automatizados no quieren que sus algoritmos y ajustes se popularicen, para que la competencia no pueda utilizarlos.

Las bases científicas de la medición de VO_2 (ml/min) y VCO_2 (ml/min) son las siguientes ecuaciones elementales:

$$VO_2 = (V_I \cdot F_{IO_2}) - (V_E \cdot F_{EO_2}) \quad (1)$$

$$VCO_2 = (V_E \cdot F_{ECO_2}) \quad (2)$$

Cuando V_I y V_E son iguales (relación de intercambio respiratorio <1), la ecuación 1 se puede simplificar:

$$VO_2 = V_E \cdot (F_{IO_2} - F_{EO_2}) \quad (3)$$

Sin embargo, tanto los criterios para establecer una prueba máxima como para evaluar el VO_2 en atletas, V_I y V_E , son diferentes. Como resultado, la ecuación 2 no se puede aplicar, ya que V_E excede de V_I .

Según Ramos-Álvarez et al., (2020) existen problemas de la aplicación de ecuaciones de transferencia para el análisis del intercambio de gases respiratorios. Cuando VO_2 se mide por la ecuación 3, que ignora la desigualdad entre los volúmenes inspirados y expirados, el error involucrado depende de las magnitudes del cociente respiratorio (RQ) y el F_{IO_2} para un RQ igual a 1, la ecuación 3 no muestra ningún error independientemente del F_{IO_2} . Sin embargo, para un valor fijo de F_{IO_2} , el error aumenta a medida que RQ se desvía de la unidad, y para un valor fijo de RQ distinto de la unidad, el error aumenta los valores de F_{IO_2} . Para un $F_{IO_2} = 0.2$ (cerca del aire ambiente; $F_{IO_2} = 20.9$) el error no se puede suponer si la ecuación 3 se aplica.

El significado fisiológico del consumo máximo de oxígeno es la tasa máxima de "captación" de oxígeno (aparato respiratorio), "bombeo y distribución" de oxígeno (sistema cardiovascular), "transporte físico" de oxígeno (hemoglobina) y "utilización" de oxígeno (principalmente en el tejido muscular). Esta perspectiva integradora permite abordar los factores limitantes de VO_{2max} , siendo la capacidad del corazón para transportar oxígeno y ser acomodada por el músculo en funcionamiento (Capelli et al., 2006). Matemáticamente, el análisis integrado se puede mostrar igualando la ecuación 3 y la ecuación de Fick para la determinación del gasto cardíaco medio. Todos los elementos que intervienen en la determinación del consumo máximo de oxígeno son: ventilación máxima (V_{Emax}), gasto cardíaco máximo (Q_{max}), concentración de hemoglobina (Hb), vasodilatación máxima (MV) y actividad mitocondrial máxima.

$$Q = VO_2 / Dif_{a-v}O_2 \rightarrow VO_2 = Q \cdot Dif_{a-v}O_2 \quad (4)$$

Según Ramos-Álvarez et al., (2020) la ecuación 4 está incompleta porque no considera el papel del aparato respiratorio.

La tasa neta de intercambio de cualquier gas es la diferencia entre la cantidad inspirada y la cantidad vencida por unidad de tiempo, denominado “la transformación de Geppert y Zuntz” (Geppert & Zuntz, 2012, citado por Ramos-Álvarez et al., 2020). Las ecuaciones 1 y 2 permiten el cálculo simple de la tasa de intercambio de oxígeno y dióxido de carbono. Dado que, en estado de reposo, el cuerpo no produce ni consume nitrógeno, la tasa de intercambio de nitrógeno en condiciones estables es cero, de modo que:

$$F_{I}N_2 \cdot V_I = F_{E}N_2 \cdot V_E; \quad V_I = F_{E}N_2 / F_{I}N_2 \quad (5)$$

Estas relaciones simples, pensadas por Gepper y Zuntz, permiten calcular el consumo de oxígeno y la producción de dióxido de carbono cuando se conoce el volumen expirado por minuto y la composición del aire inspirado y expirado.

$$VO_2 = F_{I}O_2 \cdot F_{E}N_2 / F_{I}N_2 - F_{E}O_2 \cdot V_E \quad (6)$$

$$VCO_2 = F_{E}CO_2 - F_{E}N_2 / F_{I}N_2 \cdot F_{I}CO_2 \cdot V_E \quad (7)$$

Dado que las condiciones de medición del volumen de gas involucrado pueden variar ampliamente en diferentes circunstancias, es necesario corregir los valores medidos a las condiciones estándar de temperatura y presión ($^{\circ}C$, 760 mm Hg, seco). Por lo tanto, mientras la ventilación se mide bajo la temperatura y presión del cuerpo, las condiciones saturadas (BTPS), VO_2 y VCO_2 se expresan en temperatura y presión estándar, seco (STPD).

Por último, en un estudio reciente (Ramos-Álvarez et al., 2020) reportan que llevan años intentando que Jaeger, a través de su distribuidor en España, les facilite las ecuaciones que utiliza su software para determinar el VO_2 y el VCO_2 . Proponen que el sistema no podía usar diferentes ecuaciones hasta que los valores de $RQ = 1$ y otro algoritmo cuando $RQ > 1$ y plantean que muchos de estos sistemas de software utilizan las siguientes ecuaciones:

$$VO_2 = (V_E \cdot KH \cdot F_{I}O_2 / 100 - V_E \cdot F_{E}O_2 / 100) \cdot KBS \quad (8)$$

$$VCO_2 = (V_E \cdot F_{E}CO_2 / 100 - V_E \cdot KH \cdot F_{I}CO_2 / 100) \cdot KBS \quad (9)$$

Donde KH es una transformación de la ecuación de Gepper y Zuntz $KH = (100 - F_{E}O_2 - F_{E}CO_2) / (100 - F_{I}O_2 - F_{I}CO_2)$ y KBS es el factor de corrección para convertir BTPS a condiciones STPD $KBS = AP \text{ en mm Hg} - 47$.

En la siguiente tabla se observan las variables típicas que se evalúan mediante las pruebas ergoespirométricas.

Tabla 2. Variables comúnmente utilizadas en la evaluación de las pruebas de ergoespirometría.

Variable	Método de obtención
Volumen corriente (ml) (V_T)	Dividiendo V_T entre la frecuencia respiratoria (B_F)
Producción de dióxido de carbono (ml/min) (VCO_2)	Ecuación 2
Consumo de oxígeno absoluto (l/min o ml/min) (VO_2 abs)	Ecuación 1 o 3
Consumo de oxígeno relativa (ml x kg^{-1} x min^{-1}) (VO_2)	Dividiendo el consumo de oxígeno absoluto entre la masa corporal y el tiempo
Ratio de intercambio respiratorio (RER)	Dividiendo la producción de dióxido de carbono entre el consumo de oxígeno absoluto (VCO_2/VO_2 abs)
Pulso de oxígeno (ml/latido) (O_2 pulse)	Dividiendo el consumo de oxígeno entre la frecuencia cardiaca
Unidad metabólica (Met)	Dividiendo el consumo de oxígeno relativo entre unidad metabólica (3,5 ml x kg^{-1} x min^{-1} = 1 Met)
Equivalente ventilatorio de oxígeno (V_E/VO_2)	Dividiendo la ventilación entre el consumo de oxígeno absoluto (ml/min)
Equivalente ventilatorio de dióxido de carbono (V_E/VCO_2)	Dividiendo la ventilación entre la producción de dióxido de carbono
Presión de oxígeno tele-espiratoria (mm Hg) (PET O_2)	Medición directa en algunos dispositivos
Presión de dióxido de carbono tele-espiratoria (mm Hg)	Medición directa en algunos dispositivos
Tiempo respiratorio total (seg) (T_T)	Inverso de la frecuencia respiratoria
Tiempo de inspiración (seg) (T_i)	Medición directa
Tiempo de espiración (seg) (T_e)	Medición directa
Generador central inspiratorio (ml/seg) (V_T/T_i)	Dividiendo el volumen corriente entre el tiempo de inspiración
Interruptor inspiratorio (T_T/T_i)	Dividiendo el tiempo respiratorio total entre el tiempo de inspiración

4.3 Parámetros relacionados con el consumo máximo de oxígeno (VO_{2max})

4.3.1 Los umbrales ventilatorios

Se han descrito varias técnicas basadas en la inspección de las parcelas de intercambio de gases respiratorios para medir el VO_{2max} y los umbrales ventilatorios, pero no se ha establecido un estándar de oro.

4.3.1.1 Umbral aeróbico (UA-VT1)

Hoy en día no existe una metodología que esté diseñada exclusivamente para la medición del umbral aeróbico. En su tesis, Benito-Peinado, (2004) resume que mediante los siguientes métodos se puede determinar el umbral aeróbico:

- **Método V-Slope** (Beaver et al., 1986): Se utilizan únicamente el VO_2 y el VCO_2 como parámetros intervinientes. El método consiste en representar el VO_2 con respecto a sí mismo y el VCO_2 en función del primero. El criterio para identificar el umbral aeróbico, es el punto donde la función de regresión lineal del VCO_2 corta a la línea de regresión del VO_2 .

En el estudio de Cerezuela-Espejo et al, (2018) la carga de V-Slope se identificó en la intensidad de ejercicio que, en una gráfica de la producción minuto de CO_2 sobre la utilización minuto de oxígeno (VO_2), muestra un aumento en la pendiente por encima de 1.0 (Wasserman et al., 1973; Gaskill et al., 2001).

- **Equivalentes respiratorios** (Caiozzo et al., 1982; Davis et al., 1985): Existen dos puntos de vista respecto a este método, por un lado, según Davis et al., (1985) el umbral aeróbico se sitúa en "el punto más bajo del equivalente de O_2 , cuando el equivalente de CO_2 permanece constante o disminuye" (Davis 1985), por otro lado, según Caiozzo et al., (1982) se sitúa en el "el incremento sistemático del equivalente de O_2 sin un incremento concomitante del equivalente de CO_2 ".
- **Exceso de VCO_2** (Gaskill et al., 2001): Este método se basa en "Incremento no sistemático de la producción de CO_2 " (Gaskill et al., 2001). Siendo la fórmula:
$$ExCo_2 = (VCO_2)^2 / VO_2 - VCO_2$$
- **Ventilación**: El umbral aeróbico se determina cuando se da "el primer incremento en la ventilación no proporcional a la carga" (Skinner & McLellan, 1980).

- **Relación Vd/Vc:** La ecuación de Bohr relaciona las variables VD/Vc (relación volumen del espacio muerto, volumen corriente), PaCO₂ (presión arterial de CO₂) y PETCO₂ o presión del CO₂ al final de la respiración (Benito-Peinado, 2004). $VD/Vc = (PaCO_2 - PetCO_2) / PaCO_2$

En este método, el umbral aeróbico se determina mediante "el punto más bajo en la relación a partir del cual comienza un ascenso constante e interrumpido" [Jones, 1976, citado por Chicharro & Legido, 1991, citado por Benito-Peinado, 2004]

- **Presión al final de cada respiración (PET CO₂ y PET O₂).** En el umbral aeróbico la PET CO₂ y la PET O₂ se estabilizan. Por un lado, la PET O₂ disminuye desde el principio de la prueba incremental hasta que se estabiliza y, por otro lado, la PET CO₂ aumenta progresivamente hasta la estabilización que se produce en el umbral aeróbico (Benito-Peinado, 2004).
- **Cociente Respiratorio:** El punto más bajo del cociente respiratorio a partir del cual se aprecia un aumento sucesivo (Benito-Peinado, 2004).

4.3.1.2 Umbral Anaeróbico (Uan-VT2)

El umbral anaeróbico (VT2), fue definido por Wasserman en 1973 para describir la transición de una vía predominantemente oxidativa a una vía anaeróbica (Wasserman et al, 1973) y hace referencia a la máxima intensidad de esfuerzo que un sujeto puede mantener de manera prolongada en el tiempo. Entre otros estudios, (Ivy et al., 1980) revelaron una alta correlación entre el VT2 y el rendimiento de resistencia, fatiga y cambios repentinos en el intercambio de gases respiratorios.

Como indica Benito-Peinado, (2004) en su estudio, para determinar el umbral anaeróbico se utilizan los siguientes métodos:

- **Equivalentes respiratorios:** La definición del umbral anaeróbico a través de los equivalentes parece estar más relacionada con el comienzo del equivalente de CO₂ (Beaver et al., 1986), aunque el criterio de comienzo de aumento del equivalente de CO₂ cuando el de O₂ ya había comenzado su aumento es un doble criterio preferido por la mayoría de los autores (Davis, 1985)
- **Ventilación:** El umbral anaeróbico se determina cuando el segundo incremento en la ventilación no proporcional a la carga (Ribas et al., 1994)

- **Presión al final de cada respiración:** Cuando la $PETCO_2$ comienza a disminuir de manera acusada, mientras que la de oxígeno comienza a ascender (Ribas et al., 1994)
- **Cociente respiratorio:** Cociente respiratorio igual o mayor de la unidad para el VT2 (García et al., 1996, citado por Benito-Peinado, 2004)

Un corredor que presente un VT2 más alto, podrá mantener en el tiempo una velocidad más elevada que otro corredor, obteniendo así un mayor rendimiento. Este umbral es, a su vez, dependiente de la economía de carrera, una mejora de ésta provoca una mejora del umbral anaeróbico (Bosquet et al., 2002).

Los descubrimientos recientes de Cerezuela-Espejo et al., (2018) respaldan la idea de que un modelo de entrenamiento basado en umbrales ventilatorios (VT1 y VT2) podría ser muy efectivo para establecer la intensidad del ejercicio individual en los deportes de resistencia dado que tiene en cuenta las respuestas metabólicas individuales (Wolpern et al., 2015). Uno de los sistemas más precisos para obtener estas respuestas ventilatorias se basa en los parámetros de intercambio de gases mediante calorimetría indirecta. (Gaskill et al., 2001).

Los principales hallazgos del estudio de Cerezuela-Espejo et al. (2018) fueron los siguientes: en primer lugar, la prescripción de intensidad de ejercicio basada en el umbral provocó mejoras significativas ($p < 0.05$) en el VO_{2max} en comparación con un porcentaje relativo de prescripción de intensidad de ejercicio después de 12 semanas de entrenamiento, y en segundo lugar, el ejercicio basado en el umbral el entrenamiento atenuó la variación individual en las respuestas de entrenamiento del VO_{2max} en comparación con el porcentaje relativo de entrenamiento con ejercicios, como lo demuestra la prevalencia significativamente reducida ($p < 0.05$) de los no respondedores al entrenamiento con ejercicios en el grupo de tratamiento ACE-3ZM.

En VT1, la producción de VO_2 y dióxido de carbono (VCO_2) aumenta proporcionalmente, mientras que HCO_3^- actúa para aumentar la concentración de ácido láctico en la sangre (Wasserman et al., 1973); esta intensidad es ideal para ejercicios de alta intensidad y baja intensidad (Stöggl & Sperlich, 2014). A su vez, en VT2, la acumulación de lactato en sangre aumenta y aumenta considerablemente y el sistema colapsa debido al compromiso homeostático y la acidosis metabólica (Wasserman et al., 1973); Esta intensidad establece un límite crítico para el entrenamiento en intervalos de alta intensidad (Stöggl & Sperlich, 2014). Sin embargo, los sistemas de intercambio de gases requieren el uso de equipos costosos y

condiciones de laboratorio que la mayoría de los equipos, entrenadores y atletas no están equipados o no pueden usar.

4.3.2 Velocidad máxima aeróbica (VAM)

Además de la transición aeróbica-anaeróbica, otro parámetro de ventilación para predecir el rendimiento en carrera es la velocidad máxima aeróbica (VAM) (McLaughlin et al., 2010), considerado como la velocidad mínima a la que se alcanza VO_{2max} (Lacour et al., 1991). El entrenamiento de alta intensidad en atletas de resistencia se establece en 90-105% del VAM (Stöggel & Sperlich, 2015).

Dada su importancia para los planes de entrenamiento y la distribución de la carga de trabajo, los entrenadores e investigadores han invertido esfuerzo en diseñar pruebas de campo máximo para estimar la VAM y predecir el VO_{2max} en atletas de resistencia para establecer los límites de rendimiento aeróbico (Berthon et al., 1997). Sin embargo, estas pruebas tienen dos limitaciones importantes.

En primer lugar, las ecuaciones propuestas para estimar la VAM a partir de pruebas de campo no se basan en mediciones precisas, como los sistemas de intercambio de gases que utilizan calorimetría indirecta (Gaskill et al., 2001).

En segundo lugar, no se probaron los criterios de esfuerzo máximo para garantizar alcanzar valores de VO_{2max} . Una alternativa válida a estas pruebas de campo es determinar el VAM a través de una prueba de ejercicio gradual con incrementos de 1 minuto utilizando sistemas de intercambio de gases. Estos protocolos cortos permiten a los atletas alcanzar su gasto cardíaco máximo y, por lo tanto, permiten obtener un verdadero valor de V_{peak} (Julio et al., 2017). Dado que ambos, VAM y V_{peak} corresponden a intensidades similares (Lacour et al., 1991) el cálculo de un VAM estimado (VAMEST) desde el V_{peak} , cuando los sistemas de intercambio de gases no están disponibles, parece prometedor. Sin embargo, esta hipótesis aún no se ha probado.

4.3.3 Economía de carrera

En su estudio, Shaw et al., (2015) analizan la correlación entre la economía de carrera y el VO_{2max} , determinando que sólo existe una asociación de mínima a moderada entre estas dos variables, siempre y cuando la masa corporal se contabilice adecuadamente. Para ello eliminaron la influencia de la masa corporal con correlaciones parciales, lo que permitió examinar la verdadera relación entre estas variables. Así pues, la economía de carrera y el VO_{2max} se determinan principalmente de manera independiente (Shaw et al., 2015).

Se ha encontrado que la combinación de EC y VO_{2max} , definida como la velocidad en VO_{2max} (vVO_{2max}) representa $\sim 94\%$ de la varianza interindividual en el rendimiento de carrera en 16.1 km (McLaughlin et al., 2010). Los valores excepcionales de EC y VO_{2max} se consideran requisitos para el éxito en las competiciones de resistencia de élite, y los corredores de resistencia se esfuerzan por mejorar ambos parámetros a través del entrenamiento para maximizar el rendimiento.

Se considera que la vVO_{2max} es un mejor indicador de rendimiento que el VO_{2max} , ya que combina de manera efectiva tanto el VO_{2max} como la economía de carrera en un término (di Prampero et al., 1986) y también se puede utilizar para explicar las diferencias interindividuales en el rendimiento que el VO_{2max} o la economía de carrera por sí sola no pueden (Billat & Koralsztein, 1996; Billat et al., 2000; Jones & Carter, 2000).

En comparación con VO_{2max} , vVO_{2max} es un mejor predictor para el rendimiento de carrera de media y larga distancia y se ha reportado que debería usarse para monitorizar el entrenamiento de los atletas y para determinar la intensidad óptima del entrenamiento para los corredores de distancia (Billat & Koralsztein, 1996; Billat et al., 2000). Además, parece que vVO_{2max} es la velocidad mínima requerida para obtener el VO_{2max} del atleta, y es necesario entrenar a esta velocidad para mejorar el VO_{2max} y, por lo tanto, la capacidad aeróbica. (Billat & Koralsztein, 1996; Billat et al., 2000; Hill & Rowell, 1997; Jones & Carter, 2000).

Dentro de los grupos de corredores de distancia entrenados se ha sugerido que una EC superior, cuantificada como la captación de oxígeno submáxima, se asocia con una menor VO_{2max} (Pate et al., 1992).

Por consiguiente, los valores excepcionales de EC y VO_{2max} se consideran requisitos para el éxito en las competiciones de resistencia de élite, y los corredores de resistencia se esfuerzan por mejorar ambos parámetros mediante el entrenamiento para maximizar el rendimiento. Como el margen de éxito es extremadamente pequeño en las carreras de distancia de élite, las mejoras sutiles en cualquiera de los parámetros podrían dar lugar a un aumento sustancial del rendimiento. Por lo tanto, es necesario comprender la relación de la EC y VO_{2max} tanto entre los individuos como dentro de ellos para comprender y optimizar el rendimiento.

5. ECONOMÍA DE CARRERA

5.1 Introducción

El rendimiento de la carrera a distancia depende, entre otras cosas, de la producción de energía sostenida, predominantemente aeróbica, y de la conversión de esta energía en movimiento hacia adelante, llamado economía de la carrera (EC). La economía de carrera tiene una fuerte relación con el rendimiento de carrera de larga distancia y es un mejor predictor del rendimiento que el VO_{2max} en corredores de élite con valores de VO_{2max} similares (Saunders et al., 2004).

La EC puede ser definida como la energía necesaria para funcionar de forma submáxima a una velocidad indicada (Conley & Krahenbuhl, 1980; Saunders et al., 2004) o como consumo de oxígeno en estado estable que se requiere a una velocidad submáxima establecida (Kyrolainen et al., 2001; Nummela et al., 2006).

Se determina midiendo el consumo de oxígeno en estado estable (VO_2) y la relación de intercambio respiratorio, teniendo en cuenta la masa corporal, ya que cuando se corre a la misma velocidad, los corredores con buena EC gastan menos energía y, por lo tanto, menos oxígeno que los corredores con mala EC (Saunders et al., 2004). Además Saunders et al. (2004) identificaron un consenso en la literatura de que los corredores entrenados exhiben una mejor EC que los corredores no entrenados.

Distintos autores afirman que la EC es un importante determinante del rendimiento en carreras de distancia y se considera un buen predictor del rendimiento de la carrera (Conley & Krahenbuhl, 1980; Hoogkamer et al., 2016) y como hemos visto en el anterior apartado, es considerado un mejor predictor del rendimiento de resistencia en comparación con el VO_{2max} en corredores de élite con VO_{2max} similar (Conley & Krahenbuhl, 1980; Saunder et al, 2004).

Aun así, se discute sobre el verdadero papel de la economía de carrera en el rendimiento, ya que al igual que pasaba con el VO_{2max} , en grupos homogéneos de corredores no ha sido una variable discriminante del mismo (Mooses et al., 2015).

5.2 Medición

La mayoría de estudios para medir la EC se realizan mediante protocolos incrementales en cintas de correr monitorizadas, como por ejemplo en los estudios realizados por Tartaruga et al., (2012) y Shaw et al., (2014), esta práctica supera muchas de las dificultades para obtener datos metabólicos fiables en el campo, ya sea durante el entrenamiento o la competición. La resistencia del aire y el viento se eliminan eficazmente durante la carrera en interiores.

La EC se ha medido típicamente como el costo de oxígeno de correr a una distancia dada a una velocidad submáxima, siendo la unidad ml/kg/km. Los corredores altamente entrenados presentan valores entre 175-220 ml x kg⁻¹ x km⁻¹ (Lucia et al., 2006).

Sin embargo, debido a que en los grupos homogéneos de corredores los valores no son discriminativos, se ha empezado a expresar como el costo metabólico para cubrir una distancia establecida a velocidad submáxima en kcal x kg⁻¹ x km⁻¹, teniendo en cuenta el cociente respiratorio, y la contribución anaeróbica al esfuerzo. (Shaw et al., 2014),

Según Shaw et al., (2014), el cálculo válido de la EC se realiza mediante el cálculo del VO_2 y VCO_2 durante el último minuto de cada etapa submáxima y posteriormente utilizar ecuaciones actualizadas del cociente respiratorio no proteínico (Péronnet & Massicotte, 1991) para estimar la utilización del sustrato (g/min) durante el período monitorizado. A continuación, se calcula la energía derivada de cada sustrato multiplicando la utilización de grasas y carbohidratos por 9,75 kcal y 4,07 kcal, respectivamente, lo que refleja el contenido energético medio de los sustratos metabolizados durante el ejercicio de intensidad moderada a alta (Jeukendrup & Wallis, (2005) citado por Shaw et al., (2014)). A continuación, la EC se cuantifica como la suma de estos valores, expresada en kcal/km. Por último, se mide el VO_2 durante el último minuto de cada etapa submáxima, para determinar el costo del oxígeno en ml/km a fin de permitir comparaciones con investigaciones anteriores.

En el estudio de Conley & Krahenbuhl, (1980) la EC fue registrada durante un ejercicio de intensidad submáxima realizado por corredores a la misma intensidad relativa (expresada en porcentaje de las velocidades alcanzadas en el VO_{2max} o correspondiente al umbral de ventilación [VT]). Sin embargo, estas velocidades relativas representan diferentes velocidades absolutas de funcionamiento y, por lo tanto, distintos niveles de demanda mecánica.

5.3 Parámetros que afectan a la economía de carrera

Correr es un movimiento relativamente libre con numerosos grados de libertad, los corredores utilizan diversas "técnicas", existiendo una gran variación interindividual en el patrón de zancada (Nummela et al., 2007).

Pese a que existen varios estudios analizando la relación entre la EC y los parámetros biomecánicos, los resultados son contradictorios y pocos estudios encuentran una relación significativa entre las variables cinemáticas, la actividad muscular en las extremidades inferiores y la EC en los corredores de larga distancia.

Los siguientes aspectos de la cinemática pueden influir en la EC y el rendimiento: los parámetros de la zancada (frecuencia y longitud), los ángulos de las extremidades inferiores, el desplazamiento vertical del cuerpo (oscilación vertical), los cambios en la velocidad horizontal durante el contacto con el suelo (frenado) y la orientación del tronco y la pelvis (postura).

Sin embargo, Kyrolainen et al., (2001) sostienen que la mecánica de la carrera es un mal predictor de la EC e identifican la fuerza cinética de frenado como el principal factor que explica la EC y no las variables cinemáticas.

En otro estudio, Santos et al., (2014) descubrieron que tanto la fase de balanceo como el ángulo de zancada pueden ser discriminadores efectivos de los patrones de marcha eficiente en grupos homogéneos. Indicando que en el entrenamiento para carreras de larga distancia, un aumento del ángulo de zancada puede mejorar el rendimiento debido a una mejora de la EC.

Según varios autores, la mayor relación significativa respecto a la EC se da con las características de zancada y el tiempo de contacto (Saunders et al., 2004; Tartaruga et al., 2012). Se observa una mejora en la EC con una disminución del tiempo de contacto (un menor costo de oxígeno al correr) (Nummela et al., 2006; Tartaruga et al., 2012). Esta relación puede estar relacionada con la velocidad perdida durante la fase de frenado (Nummela et al., 2006).

5.3.1 Frecuencia/Longitud de zancada

La velocidad de la carrera es el producto de la velocidad de zancada (frecuencia) y la longitud de la zancada. Aunque tanto la velocidad de la zancada como la longitud de la plaza aumentan con el incremento de la velocidad de la carrera, la longitud de la zancada es responsable del incremento de la velocidad hasta el 90% de la velocidad máxima individual y, a partir de entonces, la velocidad sólo se incrementa al aumentar la velocidad de la zancada (Weyand et al., 2000). Cavanagh & Williams, (1982) encontraron que la longitud de zancada más económica de un grupo de corredores estaba cerca de la que se elegía libremente. La fase de contacto con el suelo es la única fase durante un ciclo de carrera en la que un corredor puede producir fuerza e influir en la longitud de la zancada y en la velocidad de la carrera.

La longitud de zancada se determina con la distancia que recorre la cinta desde que despega un pie hasta que ese mismo pie se vuelve a apoyar y la frecuencia con el número de zancadas por minuto.

Se ha demostrado que los componentes verticales y horizontales de las fuerzas de reacción del suelo aumentan con el incremento de la velocidad de carrera. (Kyrolainen et al., 2001; Weyand et al., 2000). Por lo tanto, una larga fase de contacto con el suelo y una gran

desaceleración de la velocidad horizontal durante la fase de frenado del podría considerarse un despilfarro en términos de los requisitos metabólicos.

Sólo los tiempos de contacto con el suelo tienen correlaciones estadísticamente significativas con la economía y la máxima velocidad de carrera (Nummela et al., 2007).

En varios estudios (Cavanagh & Williams, 1982; Nummela et al., 2007; Nummela et al., 2006; Tartaruga et al 2012) informaron de que las pautas relativamente eficientes utilizadas durante la carrera indican una adaptación a la longitud de zancada elegida mediante el entrenamiento (adaptación biomecánica) o un proceso satisfactorio de optimización de la energía (adaptación fisiológica). Estas adaptaciones pueden dar lugar a una relación negativa entre la frecuencia de las zancadas y la EC y una correlación positiva entre la longitud de las zancadas y el EC (Tartaruga et al., 2012). De hecho, se ha demostrado que los corredores de distancia de élite poseen un equilibrio óptimo entre la longitud y la frecuencia de las zancadas en comparación con los buenos corredores de distancia reflejando una EC y un mejor rendimiento de carrera (Saunders et al., 2004).

Pese a todo, no existe un consenso entre la relación de la frecuencia y la longitud de zancada y la EC. Por un lado, Cavanagh & Williams (1992) manifiestan que un corredor de resistencia exitoso se caracteriza por una longitud de zancada más larga y Tartaruga et al. (2012) defienden que mientras se entrena para carreras de larga distancia, la reducción de la frecuencia de las zancadas y el aumento de la longitud de las zancadas pueden mejorar el rendimiento debido al aumento de la EC, pese a que sus resultados de dicha relación no son muy claros ($r=-.61$ la relación "frecuencia-EC" y $r=.61$ la relación "longitud-frecuencia"). Por otro lado, los resultados de Santos et al., (2014) muestran que no hay una relación significativa entre la frecuencia y la longitud de zancada y la EC en un grupo homogéneo de corredores de distancia de elite masculinos.

En su estudio, Santos et al., (2014) reportan que la ejecución más óptima del ángulo de zancada (el ángulo de la parábola tangente derivada del arco trazado por el pie durante una zancada y el suelo) permite a los corredores maximizar la fase de balanceo y minimizar el tiempo de contacto con una transferencia efectiva de energía durante el contacto con el suelo, logrando así un patrón de carrera económico.

5.3.2 Leg Stiffness

El stiffness se define como una expresión de la compresibilidad de los sistemas durante la aplicación de la fuerza, como las interacciones con el suelo al correr y saltar (Pearson & McMahon, 2012). El stiffness, que se cree que sustenta las adaptaciones neuromusculares que

conducen a un mejor o superior rendimiento en la carrera, explica en parte las diferencias interindividuales en v_{max} (Brughelli & Cronin, 2008a; Chelly & Denis, 2001). Del mismo modo, el stiffness se ha vinculado a la EC en grupos con capacidad aeróbica alta (Dalleau et al., 1998). Anteriormente se han reportado asociaciones positivas entre el stiffness y el v_{max} en sprinters (Chelly & Denis, 2001; Morin et al., 2006). Se sabe poco sobre las relaciones entre el stiffness, la economía y la capacidad de esprintar de los corredores de media distancia, que deben mantener velocidades casi máximas durante la competición.

El comportamiento elástico de un muelle se caracteriza por su rigidez (stiffness) y eso determina la relación entre su deformación y la fuerza que se le aplica. McMahon & Cheng, (1990) han demostrado que una variación intraindividual del stiffness podría influir de manera significativa en el coste metabólico de la carrera. Cuando los humanos aumentan su frecuencia de zancada a una velocidad de carrera dada, el ajuste más importante es el aumento del leg-stiffness (Farley & González, 1996).

Como Brughelli & Cronin (2008b) mencionan en su estudio, se cree que el stiffness mecánico en la pierna humana tiene una influencia importante en diversas variables atléticas, entre las que se incluyen las siguientes: tasa de desarrollo de la fuerza, almacenamiento y utilización de la energía elástica y cinemática del sprint, es decir, tiempos de contacto y vuelo, y longitud y frecuencia de las zancadas. Sin embargo, la mecánica óptima del stiffness necesaria para movimientos como correr y saltar sigue siendo un tema de debate para los científicos y las comunidades deportivas.

Las medidas de stiffness global comprenden el stiffness vertical, la de las piernas y la de las articulaciones. La masa del cuerpo del corredor se apoya en los "muelles" de la/las pierna/s de apoyo, con cada medida sucesiva de stiffness global (vertical, pierna y articulación), incorporando un mayor número de componentes musculoesqueléticos y neuronales implicados en las tareas de salto y carrera (Brughelli & Cronin, 2008b).

El stiffness global se determina por medidas aisladas o componentes en los miembros inferiores, que examinan varias unidades músculo-tendinosas en un esfuerzo por comprender las contribuciones de estructuras específicas dentro de los "muelles de las piernas". Sin embargo, sigue sin estar claro si las diferentes cuantificaciones del stiffness, de componente a global, están interrelacionadas. El uso de una prueba de campo simple y práctica del stiffness puede proporcionar una visión de las diversas capacidades metabólicas y mecánicas de los atletas de media distancia. A pesar de algunas investigaciones en esta área en los corredores, (Barnes et al., 2014; Dalleau et al., 1998) poco se sabe cómo las pruebas de campo pueden

relacionarse con otras evaluaciones del stiffness y las estructuras dentro de la pierna. Por ello, parece difícil para los profesionales seleccionar el método apropiado para evaluar los mecanismos que subyacen a las mejoras tanto en la velocidad como en la eficiencia de la carrera.

El stiffness vertical, el stiffness de la pierna y el stiffness de la articulación se calcula mediante la utilización de film/video, placas de fuerza, brazos cinemáticos, alfombras de contacto y sensores de presión (Brughelli & Cronin, 2008b).

Kyrolainen et al., (2001) encontraron que la tasa de producción de fuerza aumentaba con el aumento de la velocidad de carrera y que el componente horizontal (de frenado) de la fuerza de reacción del suelo estaba relacionado con la EC. Sugiriendo que el aumento de la actividad previa al aterrizaje y la frenada de los músculos de los tendones de las piernas podrían evitar el rendimiento innecesario del corredor durante la fase de frenado, con un aumento del stiffness músculo-tendinosa, y una mejora resultante en la EC.

Farley & Gonzalez (1996) utilizan un modelo de masa de muelle que representa, por un lado, toda la masa del sujeto como una masa de un solo punto y, por otro, todo el sistema musculoesquelético como un solo muelle lineal, para analizar la carrera en su estudio.

En el estudio de Farley & Gonzalez (1996) aunque el stiffness de las piernas no cambió significativamente con la velocidad de la carrera, sí lo hizo cuando la frecuencia de los pasos aumentó a una velocidad constante determinada. Observaron que al aumentar la frecuencia de las zancadas, el desplazamiento vertical del centro de masa durante la fase de contacto con el suelo disminuyó sustancialmente. Además, al aumentar la frecuencia, el tiempo de contacto con el suelo, disminuyó. Estas observaciones sugieren que hubo cambios sustanciales en el stiffness vertical para acomodar los cambios en la frecuencia de las zancadas.

La pendiente de la relación entre la fuerza vertical y el desplazamiento vertical del centro de masa aumentó a mayores frecuencias de zancada, lo que sugiere que el stiffness vertical, aumentó a mayores frecuencias de zancada. Concluyendo que el stiffness vertical aumenta, a frecuencias de zancada más altas. A una velocidad dada el stiffness de las piernas aumenta aproximadamente el doble cuando la frecuencia de los zancada aumenta un 65% (Farley & González, 1996).

En cuanto a la relación del stiffness con el rendimiento, algunos autores han argumentado que una mayor mecánica stiffness sería beneficiosa para movimientos como correr y saltar (Chelly & Denis, 2001). Estos argumentos se han basado en estudios que han

demostrado que tanto el stiffness vertical como el stiffness de la articulación aumentan con la velocidad de la carrera y la altura del salto (Farley et al., 1991).

Se ha sugerido que la economía de carrera se relaciona con el stiffness de la pierna de apoyo (Dalleau et al., 1998), y el movimiento de la pierna que se balancea puede contribuir ~20% al costo de la locomoción (Modica & Kram, 2005), los ángulos mínimos de la articulación de la rodilla durante las fases de apoyo y balanceo también podrían ser variables clave. Dado que una proporción sustancial del trabajo durante la carrera está implicado en la oposición a la gravedad, se ha postulado ampliamente que la amplitud de la oscilación vertical del centro de masa (Saunders et al., 2004).

En el estudio de Morin et al., (2007), confirman que el stiffness de las piernas está influenciado significativamente por las variaciones de frecuencia de paso durante la carrera a velocidad constante.

El efecto del tiempo de contacto con el suelo parece ser un determinante directo del stiffness de las piernas (Morin et al., 2007). Teniendo en cuenta que la frecuencia de paso es igual a la suma del tiempo de contacto y el tiempo de vuelo elevado a la menos uno, resulta interesante relacionar además la frecuencia de paso con el leg stiffness, ya que según Morin et al., (2007), el 90-96% de la varianza en leg stiffness puede explicarse por el tiempo de contacto.

La disminución del tiempo de contacto con el suelo produjo un aumento significativo ($P < 0,05$) del stiffness de las piernas; por el contrario, el aumento del tiempo de contacto con el suelo de manera significativa ($P < 0,05$) disminuyó el stiffness de las piernas (Morin et al., 2007). El aumento de la frecuencia de los pasos resulta en una disminución ($P < 0,05$) del tiempo de contacto con el suelo, el desplazamiento vertical del centro de masa y la variación de la longitud de las piernas (compresión).

Morin et al., (2007) concluye que los cambios en el stiffness de las piernas están relacionados principalmente con los cambios en el tiempo de contacto, más que con los de la frecuencia de los pasos. La frecuencia de los pasos parece ser un factor que influencia indirectamente al stiffness de las piernas, a través de su efecto en el tiempo de contacto. Este último podría considerarse un determinante importante de esta masa de muelles característica de la carrera humana.

6. CONCLUSIONES

Mediante esta revisión podemos concluir que cuanto mayor sea el valor de VO_{2max} mayor será el rendimiento, no obstante, en los grupos de elite se homogeneizan los valores y ya no es un factor discriminante del rendimiento. En ese punto, el vVO_{2max} y la economía de carrera determinan qué atleta obtendrá mejores resultados.

Una mejora en la economía de carrera, mejora el umbral anaeróbico y se asocia a un menor VO_{2max} , pudiendo así un corredor mantener en el tiempo una velocidad más elevada que otro corredor, obteniendo un mayor rendimiento.

Así pues, la economía de carrera es considerada un mejor predictor del rendimiento en comparación el VO_{2max} en corredores de élite, siendo influenciada por los parámetros de zancada, los ángulos de las extremidades inferiores, el desplazamiento vertical del cuerpo, los cambios en las velocidades horizontales durante el contacto con el suelo y la orientación del tronco y la pelvis.

Con esta revisión podemos observar que no está muy clara la relación entre la longitud y la frecuencia de zancada y la economía de carrera. De todos modos, muchos autores coinciden en que la mayor relación significativa respecto a la economía de carrera se da con las características de zancada, mediante una longitud de zancada mayor, y el tiempo de contacto, con un tiempo de contacto menor.

No obstante, estas declaraciones no hay que considerarlas como absolutas, ya que no existe un consenso en la literatura y algunos estudios muestran que no existe una relación significativa entre la frecuencia y la longitud de zancada y la economía de carrera.

Por último, en cuanto al leg-stiffness, se sabe poco a día de hoy sobre su influencia en la economía de carrera y el rendimiento, aunque algunos autores defienden que una mayor mecánica de stiffness sería beneficiosa para los corredores. Con relación al leg-stiffness se ha observado que al disminuir el tiempo de contacto con el suelo aumenta el stiffness de las piernas. Por lo que lo único en claro que se puede sacar es que un menor tiempo de contacto con el suelo está asociado a un mayor rendimiento.

7. LIMITACIONES

La principal limitación que me he encontrado a la hora de hacer el trabajo es que cuando empezó el confinamiento debido al COVID-19 no tenía instalado el VPN en casa y no podía seguir descargándome archivos de Pubmed porque no lo he conseguido instalar.

8. REFERENCIAS

- Astorino, T., & Schubert, M. (2014). Individual Responses to Completion of Short-Term and Chronic Interval Training: A Retrospective Study. *Plos ONE*, 9(5), e97638. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097638>
- Barnes, K., Mcguigan, M., & Kilding, A. (2014). Lower-Body Determinants of Running Economy in Male and Female Distance Runners. *Journal Of Strength And Conditioning Research*, 28(5), 1289-1297. <https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000000267>
- Beaver, W., Wasserman, K., & Whipp, B. (1986). A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *Journal Of Applied Physiology*, 60(6), 2020-2027. <https://doi.org/10.1152/jappl.1986.60.6.2020>
- Benito Peinado, P. (2004). *Estudio del modelo respiratorio: Nuevo método de determinación de los umbrales ventilatorios* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Bergh, U., Sjodin, B., Forserberg, A., & Svedenhag, J. (1991). The relationship between body mass and oxygen uptake during running in humans. *Medicine & Science In Sports & Exercise*, 23(2), 205-211. <https://doi.org/10.1249/00005768-199102000-00010>
- Berthon, P., Fellmann, N., Bedu, M., Beaune, B., Dabonneville, M., Coudert, J., & Chamoux, A. (1997). A 5-min running field test as a measurement of maximal aerobic velocity. *European Journal Of Applied Physiology*, 75(3), 233-238. <https://doi.org/10.1007/s004210050153>
- Billat, V.L., Flechet, B., Petit, B., Muriaux, G., & Koralsztein, J.P. (1999). Interval training at VO_{2max} : effects on aerobic performance and overtraining markers. *Medicine & Science In Sports & Exercise*, 31(1), 156-163. <https://doi.org/10.1097/00005768-199901000-00024>
- Billat, V.L., & Koralsztein, J.P. (1996). Significance of the Velocity at VO_{2max} and Time to Exhaustion at this Velocity. *Sports Medicine*, 22(2), 90-108. <https://doi.org/10.2165/00007256-199622020-00004>
- Billat, V.L., Slawinski, J., Bocquet, V., Demarle, A., Lafitte, L., Chassaing, P., & Koralsztein, J.P. (2000). Intermittent runs at the velocity associated with maximal oxygen uptake enables subjects to remain at maximal oxygen uptake for a longer time than intense

but submaximal runs. *European Journal Of Applied Physiology*, 81(3), 188-196.

<https://doi.org/10.1007/s004210050029>

Bosquet, L., Leger, L., & Legros, P. (2002). Methods to determine aerobic endurance. *Sports Medicine*, 32(11), 675-700. <https://doi.org/10.2165/00007256-200232110-00002>

Bouchard, C., & Rankinen, T. (2001). Individual differences in response to regular physical activity. *Medicine And Science In Sports And Exercise*, 33(Supplement), S446-S451. <https://doi.org/10.1097/00005768-200106001-00013>

Bouchard, C., An, P., Rice, T., Skinner, J.S., Wilmore, J.H., & Gagnon, J., Pérusse, L., Leon, A.S., & Rao, D.C. (1999). Familial aggregation of VO_2 max response to exercise training: results from the HERITAGE Family Study. *Journal Of Applied Physiology*, 87(3), 1003-1008. <https://doi.org/10.1152/jappl.1999.87.3.1003>

Brughelli, M., & Cronin, J. (2008a). Influence of Running Velocity on Vertical, Leg and Joint Stiffness. *Sports Medicine*, 38(8), 647-657. <https://doi.org/10.2165/00007256-200838080-00003>

Brughelli, M., & Cronin, J. (2008b). A review of research on the mechanical stiffness in running and jumping: methodology and implications. *Scandinavian Journal Of Medicine & Science In Sports*, 18(4), 417-426. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2008.00769.x>

Caiozzo, V. J., Davis, J. A., Ellis, J. F., Azus, J. L., Vandagriff, R., Prietto, C. A., & McMaster, W. C. (1982). A comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold. *Journal of Applied Physiology*, 53(5), 1184-1189. <https://doi.org/10.1152/jappl.1982.53.5.1184>

Capelli, C., Antonutto, G., Kenfack, M. A., Cautero, M., Lador, F., Moia, C., Tam, E., & Ferretti, G. (2006). Factors determining the time course of $VO_2(max)$ decay during bed rest: implications for $VO_2(max)$ limitation. *European Journal Of Applied Physiology*, 98, 152–160. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0252-3>

Cavanagh, P. R., & Williams, K. R. (1982). The effect of stride length variation on oxygen uptake during distance running. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14, 30–35. <https://doi.org/10.1249/00005768-198201000-00006>

Cerezuela-Espejo, V., Courel-Ibáñez, J., Morán-Navarro, R., Martínez-Cava, A., & Pallarés, J. G. (2018). The Relationship Between Lactate and Ventilatory Thresholds in Runners:

- Validity and Reliability of Exercise Test Performance Parameters. *Frontiers in Physiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.01320>
- Chelly S.M., & Denis C. (2001). Leg power and hopping stiffness: relationship with sprint running performance. *Medicine & Science In Sports & Exercise*, 33, 326-33. <https://doi.org/10.1097/00005768-200102000-00024>
- Conley, D.L., & Krahenbuhl, G.S. (1980). Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Medicine & Science In Sports & Exercise*, 12, 357–360. <https://doi.org/10.1249/00005768-198012050-00010>
- Cooper, K.H. (1968). A means of assessing maximal oxygen intake. Correlation between field and treadmill testing. *JAMA*, 203(3), 201-4. <https://doi.org/10.1001/jama.1968.03140030033008>
- Coyle, E.F. (1999). Physiological determinants of endurance exercise performance. *Journal Of Science & Medicine In Sports*, 2 (3), 181-9. [https://doi.org/10.1016/s1440-2440\(99\)80172-8](https://doi.org/10.1016/s1440-2440(99)80172-8)
- Dalleau, G., Belli, A., Bourdin, M., & Lacour, J.R. (1998). The spring-mass model and the energy cost of treadmill running. *European Journal Of Applied Physiology*, 77, 257-263. <https://doi.org/10.1007/s004210050330>
- Davis, J.A. (1985). Anaerobic threshold: review of the concept and directions for future research. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 17(1), 6-21.
- Di Prampero, P.E., Atchou, G., Bruckner, J.C., & Moia, C. (1986). The energetics of endurance running. *European Journal Of Applied Physiology*, 55(3): 259-266. <https://doi.org/10.1007/bf02343797>
- Farley, C.T., & González, O., (1996). Leg stiffness and stride frequency in human running. *Journal of Biomechanics*, 29 (2), 181–186. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(95\)00029-1](https://doi.org/10.1016/0021-9290(95)00029-1)
- Farley, C., Blickhan, R., Saito, J., & Taylor, C.R. (1991). Hopping frequency in humans: a test of how springs set stride frequency in bouncing gaits. *Journal of Applied Physiology*, 2127-2131. <https://doi.org/10.1152/jappl.1991.71.6.2127>
- Gaskill, S. E., Ruby, B. C., Walker, A. J., Sanchez, O. A., Serfass, R. C., & Leon, A. S. (2001). Validity and reliability of combining three methods to determine ventilatory threshold.

Medicine & Science in Sports & Exercise, 33, 1841–1848.

<https://doi.org/10.1097/00005768-200111000-00007>

Grant, S., Corbett, K., Amjad, A.M., Wilson, J., & Aitchison, T. (1995). A comparison of methods of predicting maximum oxygen uptake. *British Journal Of Sports Medicine*, 29(3), 147-52. <https://doi-org/10.1136/bjism.29.3.147>

Hill D.W., & Rowell, A. (1997). Responses to exercise at the velocity associated with VO_{2max} . *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 29(1), 113-116.

<https://doi.org/10.1097/00005768-199701000-00016>

Hill, A. V., & Lupton, H. (1923). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Q. J. Med.*, 16,135-171.<https://doi.org/10.1098/rspb.1924.0048>

Hoogkamer, W., Kipp, S., Spiering, B.A., & Kram, R. (2016). Altered running economy directly translates to altered distance-running performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 48(11), 2175–80. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000001012>

Ivy, J.L., Withers, R.T., Van Handel, P.J., Elger, D.H. & Costill, D.L., (1980). Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *Journal Of Applied Physiology: Respiratory, Environmental and Exercise Physiology*, 48, 523-27.

<https://doi.org/10.1152/jappl.1980.48.3.523>

Jones, A.M., & Carter, H. (2000). The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. *Sports Medicine*, 29(6), 373-386- [https://doi.org/10.2165/00007256-](https://doi.org/10.2165/00007256-200029060-00001)

[200029060-00001](https://doi.org/10.2165/00007256-200029060-00001)

Julio, U.F., Valéria, P., Seihati, S., & Franchini, E. (2017). Effect of protocol manipulating for determining aerobic power on a treadmill and cycle ergometer: A brief review.

Strength & Conditioning Journal, 39(5), 58-71.

<https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000332>

Kyrolainen, H., Belli, A., & Komi, P. V. (2001). Biomechanical factors affecting running economy. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33, 1330–1337.

<https://doi.org/10.1097/00005768-200108000-00014>

Lacour, J. R., Padilla-Magunacelaya, S., Chatard, J. C., Arsac, L., & Barthélémy, J. C. (1991).

Assessment of running velocity at maximal oxygen uptake. *European Journal Of*

Applied Physiology and Occupational Physiology, 62(2), 77–82.

<https://doi.org/10.1007/BF00626760>

Léger, L.A., & Lambert, J. (1982). A maximal multistage 20-, shuttle run test to predict VO_{2max} .

European Journal Of Applied Physiology & Occupational Physiology, 49(1), 1-12.

<https://doi.org/10.1007/bf00428958>

Lucia, A., Esteve-Lanao, J., Oliván, J., Gomez-Gallego, F., San Juan, A. F., Santiago, C., Pérez; M., Chamorro-Viña, C., & Foster, C. (2006). Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*,

31(5), 530-540. <https://doi.org/10.1139/h06-029>

McLaughlin E, Howley ET, Bassett DR, Thompson DL, & Fitzhugh EC (2010) Test of the classic model for predicting endurance running performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42, 991–997.

<https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181c0669d>

McMahon, T.A. & Cheng, G.C. (1990). The mechanics of running: How does stiffness couple with speed?. *Journal Of Biomechanics*, 23(1), 65-78.

[https://doi.org/10.1016/0021-9290\(90\)90042-2](https://doi.org/10.1016/0021-9290(90)90042-2)

Modica, J.R., & Kram, R. (2005). Metabolic energy and muscular activity required for leg swing in running. *Journal Of Applied Physiology*, 98(6), 2126–31.

<https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00511.2004>

Mooses, M., Mooses, K., Haile, D.W., Durussel, J., Kaasik, P., & Pitsiladis, Y. P. (2015).

Dissociation between running economy and running performance in elite Kenyan distance Runners. *Journal of Sports Science*, 33 (2), 136-144.

<http://doi.org/10.1080/02640414.2014.926384>

Morin, J.B., Jeannin, T., Chevallier, B., & Belli, A. (2006). Spring-Mass Model Characteristics During Sprint Running: Correlation with Performance and Fatigue-Induced Changes.

International Journal Of Sports Medicine, 27, 158-165. [https://doi.org/10.1055/s-2005-](https://doi.org/10.1055/s-2005-837569)

[837569](https://doi.org/10.1055/s-2005-837569)

Morin, J.B., Samozino, P., Zameziati, K., & Belli, A. (2007). Effects of altered stride frequency and contact time on leg-spring behavior in human running. *Journal Of Biomechanics*,

40, 3341-3348. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.05.001>

- Noakes, T.D. (1988). Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a contemporary perspective. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 20, 319-330.
<https://doi.org/10.1249/00005768-198808000-00001>
- Nummela, A.T., Keranen, T., & Mikkelsen, L.O. (2007). Factors related to top running speed and economy. *International Journal of Sports Medicine*, 28, 655–661.
<https://doi.org/10.1055/s-2007-964896>
- Nummela, A.T., Paavolainen, L.M., Sharwood, K.A., Lambert, MI, Noakes, T.D., & Rusko, H.K.(2006). Neuromuscular factors determining 5 km running performance and running economy in well-trained athletes. *European Journal Of Applied Physiology*, 97, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s00421-006-0147-3>
- Pallizca, P.J., Nichols, A.K., & Boreham, C.A. (1987). A multi-stage shuttle run as a predictor of running performance and maximal oxygen uptake in adults. *British Journal Of Sports Medicine*, 21(4), 163-5. <https://doi.org/10.1136/bjism.21.4.163>
- Pate, R.R., Macera, C.A., Bailey, S.P., Bartoli, W.P., & Powell, K.E. (1992). Physiological, anthropometric, and training correlates of running economy. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 24 (10), 1128-33.
- Pearson, S.J., & McMahon, J. (2012). Lower Limb Mechanical Properties: determining factors and implications for performance. *Sports Medicine*, 42, 929-940.
<https://doi.org/10.1007/bf03262304>
- Péronnet, F., Massicotte, D. (1991). Table of non protein respiratory quotient: an update. *Canadian Journal of Sports Science*, 16, 23–29.
- Ramos-Álvarez, J. J., Lorenzo-Capellá, I., & Calderón-Montero, F. J. (2020). Disadvantages of Automated Respiratory Gas Exchange Analyzers. *Frontiers in Physiology*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2020.00019>
- Ribas, J., Violan, M., Guerra, M. & Roman, B. (1994) Estudio comparativo de los metodos de detección del umbral ventilatorio. *Apunts*, XXXI(1), 269-275.
- Rowell, L.B. (1974) Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress. *Physiological Reviews*, 54, 75-142. <https://doi.org/10.1152/physrev.1974.54.1.75>
- Santos-Concejero J, Tam N, Granados C, Irazusta J, Bidaurrazaga-Letona I, Zabala-Lili J, & Gil SM. (2014). Stride angle as a novel indicator of running economy in well-trained

- runners. *Journal Of Strength & Conditioning Research*, 28(7), 1889-95.
<https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000325>
- Saunders, P. U., Pyne, D.B., Telford, R.D., & Hawley, J.A. (2004). Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Medicine*, 34(7), 465-485.
<https://doi.org/10.2165/00007256-200434070-00005>
- Shaw, A.J., Ingham, S.A., & Folland, J.P. (2014). The valid measurement of running economy in runners. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 46(10), 1968-73.
<https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000311>
- Shaw, A.J., Ingham, S.A., Atkinson, G., & Folland, J.P. (2015). The Correlation between Running Economy and Maximal Oxygen Uptake: Cross-Sectional and Longitudinal Relationships in Highly Trained Distance Runners. *PLOS ONE*, 10(4).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123101>
- Skinner, J.S. & McLellan, T.H. (1980). The transition from aerobic to anaerobic metabolism. *Research Quarterly for Exercise & Sport*, 51(1), 234-248.
<https://doi.org/10.1080/02701367.1980.10609285>
- Stöggl, T., & Sperlich, B. (2014). Polarized training has greater impact on key endurance variables than threshold, high intensity, or high volume training. *Frontiers in Physiology*, 5(33). <https://doi.org/10.3389/fphys.2014.00033>
- Stöggl, T., & Sperlich, B. (2015). The training intensity distribution among well-trained and elite endurance athletes. *Frontiers in Physiology*, 6(295).
<https://doi.org/10.3389/fphys.2015.00295>
- Svedenhag, J., & Sjodin, B. (1994). Body-mass-modified running economy and step length in elite male middle- and long-distance runners. *International Journal of Sports Medicine*, 15 (6), 305-10. <https://doi.org/10.1055/s-2007-1021065>
- Tartaruga, M.P., Brisswalter, J, Peyré-Tartaruga, L.A., Avila, A.O., Alberton, C.L., Coertjens, M, Cadore, E.L., Tiggemann, C.L., Silva, E.M., & Krueel, L.F. (2012). The relationship between running economy and biomechanical variables in distance runners. *Res Q Exerc Sport*, 83, 367–375. <https://doi.org/10.1080/02701367.2012.10599870>
- Taylor, H.L., Buskirk, E. & Henshel, A. (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *Journal of Applied Physiology*, 8, 73-80.
<https://doi.org/10.1152/jappl.1955.8.1.73>

Wasserman, K., Whipp, B. J., Koys, S. N., & Beaver, W. L. (1973). Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 35, 236–243.

<https://doi.org/10.1152/jappl.1973.35.2.236>

Wolpern, A.E., Burgos, D.J., Janot, J. M., & Dalleck, L.C. (2015). Is a threshold based model a superior method to the relative percent concept for establishing individual exercise intensity? A randomized controlled trial. *BMC Sports Science, Medicine & Rehabilitation*, 7(16).

<https://doi.org/10.1186/s13102-015-0011-z>

Weyand, P.G., Sternlight, D.B., Bellizzi, M.J., & Wright, S. (2000). Faster top running speeds are achieved with greater ground reaction forces not more rapid leg movements. *Journal of Applied Physiology*, 89, 1991-9. <https://doi.org/10.1152/jappl.2000.89.5.1991>