



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



MANUAL DE ACTIVIDADES PRÁCTICAS EN FISIOLOGÍA DEL EJERCICIO

AUTORES:

Felipe A. Contreras Briceño
Maximiliano Espinosa Ramírez
Eduardo Moya Gallardo

EDITORES:

Óscar F. Araneda Valenzuela
Ginés Viscor Carrasco



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN
DIRECCION DE TRANSFERENCIA Y DESARROLLO

LICENCIA DE DESCARGA

Manual de Actividades Prácticas en Fisiología del Ejercicio

El Manual de Actividades Prácticas en Fisiología del Ejercicio (el "Manual") fue creado por Felipe Andrés Contreras Briceño, Maximiliano Espinosa Ramírez, y Eduardo Moya Gallardo, y fue registrado el día 04 de abril del 2022 en el Departamento de Derechos Intelectuales del Servicio Nacional de Patrimonio Cultural bajo el N° 2022-A-2771 a nombre de su titular la PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE (UC).

Se autoriza a los usuarios de la página web de la UC www.kinesiologia.uc.cl a que accedan al Manual bajo las condiciones que se señalan a continuación:

1. Reproducir una copia del Manual con la sola finalidad de facilitar su lectura.
2. Se prohíbe expresamente al usuario que adapte, modifique o traduzca, total o parcialmente, el Manual, sin autorización previa y expresa de la UC.
3. Se prohíbe la comunicación pública y la utilización para otros fines distintos de los autorizados del Manual, sin la autorización previa y por escrito de la UC.
4. Se prohíbe expresamente la distribución por cualquier medio del Manual al público, ya sea, gratuita u onerosamente.



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

AUTORES



Felipe A. Contreras Briceño

Kinesiólogo, Universidad de Chile.

Doctor en Biomedicina, Universidad de Barcelona, Cataluña, España.

Profesor asistente, Facultad de Medicina, Pontificia Universidad Católica de Chile.



Maximiliano Espinosa Ramírez

Kinesiólogo, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Máster en Fisiología del Ejercicio, Universidad de Barcelona, Cataluña, España.

Profesor adjunto, Facultad de Medicina, Pontificia Universidad Católica de Chile.



Eduardo Moya Gallardo

Kinesiólogo, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Magíster© en Investigación en Ciencias de la Salud, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Profesor adjunto, Facultad de Medicina, Pontificia Universidad Católica de Chile.

EDITORES



Oscar F. Araneda Valenzuela, Ph.D.

Medico Cirujano - Universidad de Chile.

Doctor en Fisiología del Ejercicio - Universidad Pablo de Olavide, España.

Profesor Asociado Universidad de los Andes, Chile.

Facultad de Medicina.

Escuela de Kinesiología.



Ginés Viscor Carrasco, Ph.D.

Biólogo – Universidad de Barcelona, España.

Doctor en Fisiología – Universidad de Barcelona, España

Catedrático Universidad de Barcelona, España.

Facultad de Biología.

Departamento de Biología Celular, Inmunología y Fisiología.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.	9.
Componentes de la condición física y orientaciones a mediciones en fisiología del ejercicio	
CAPÍTULO 2.	30.
Determinantes de la evaluación de la composición corporal	
CAPÍTULO 3.	54.
Determinantes y métodos no invasivos de evaluación de la fuerza muscular	
CAPÍTULO 4.	84.
Métodos de evaluación de la potencia anaeróbica	
CAPÍTULO 5.	108.
Condicionantes de las respuestas hemodinámicas durante el ejercicio físico	
CAPÍTULO 6.	132.
Fundamentos fisiológicos de la variabilidad de la frecuencia cardiaca	
CAPÍTULO 7.	157.
Determinantes del umbral láctico y de la capacidad aeróbica máxima	
CAPÍTULO 8.	187.
Métodos de valoración indirecta de la capacidad aeróbica máxima	

INTRODUCCIÓN

La identificación de las respuestas agudas y crónicas inducidas por el ejercicio físico resultan ser las características más recordadas en la fisiología del ejercicio por quienes hemos realizado cursos relacionados a esta área, ya sea como estudiantes de pre o posgrado, lo que está bien si se considera que son los hallazgos más relevantes que debemos reconocer si nos gusta el deporte y, por tanto, lo vivenciamos en primera persona, o realizamos actividad asistencial con deportistas o pacientes. Sin embargo, muchas veces nos olvidamos del marco teórico que sustentan dichos cambios; aspecto crucial, dados los diferentes tipos de actividad física y programas de entrenamiento que se pueden realizar. Esto hace que para algunos se transforme en una verdadera odisea recordar conceptos clásicos, y mas complejo aún poder relacionarlos e integrarlos en el fenómeno que se está evaluando; mientras que para otros se transforma en el pretexto ideal para reencontrarse con libros de ciencias básicas, como aquellos de biología, química, física, bioquímica, fisiología general, análisis del movimiento, etc.

Con la finalidad de ayudar a que los contenidos teóricos de fisiología del ejercicio se plasmen en actividades prácticas que se orienten hacia el logro de objetivos de aprendizaje gracias al “aprender haciendo”, incentivando la autorreflexión y el pensamiento crítico, es que se desarrolló el presente manual de actividades prácticas. En este se incorporan las unidades más frecuentes de los programas académicos de universidades e institutos de formación profesional. En cada unidad se presenta el marco teórico que sustenta el tópico principal a tratar, englobando contenidos de diferentes libros y artículos científicos, y finaliza con actividades prácticas a desarrollar en forma personal o en grupos pequeños, tanto en ambientes libres como en el laboratorio, siempre bajo la guía de los académicos responsables de la asignatura.

En la creación de este manual participaron académicos de la carrera de Kinesiología UC, aportando a través de su experiencia docente, las mejores actividades en las que se pueda vivenciar lo explicitado previamente en forma teórica. Espero que los contenidos y la forma en que son presentados faciliten el desarrollo de la docencia en el área de la fisiología del ejercicio, tanto a académicos como a estudiantes. De igual manera, los invito a comentar respecto del entendimiento de las actividades prácticas, con la finalidad de incorporar mejoras y potenciar el objetivo principal de la creación de este libro. Por ello, invitamos a los lectores a disfrutar el “aprender haciendo” en fisiología del ejercicio.

Felipe A. Contreras Briceño

Profesor asistente

Kinesiología UC

Pontificia Universidad Católica de Chile



CAPÍTULO 1

COMPONENTES DE LA CONDICIÓN FÍSICA Y ORIENTACIONES A MEDICIONES EN FISIOLOGÍA DEL EJERCICIO

AUTOR

Felipe A. Contreras Briceño

RESUMEN

En este capítulo se introduce y orienta al lector respecto de los componentes que determinan la condición física de un individuo, con la finalidad de reconocer la necesidad de desarrollar cada una de las variables involucradas y así mejorar el rendimiento y nivel de actividad física, tanto en deportistas altamente entrenados como en sujetos físicamente inactivos o pacientes no habituados al desarrollo de ejercicio físico. Además de la definición de cada variable, se presenta su traducción en lengua inglesa —por el cual se hace alusión en las bases de datos o revistas científicas— para motivar al lector a buscar material complementario que le permita profundizar las temáticas abordadas en este capítulo. En este mismo sentido, y para lograr un entendimiento de los contenidos que aparecen en la literatura científica, se exponen también conceptos estadísticos sencillos que facilitan la comprensión de los resultados científicos utilizados comúnmente en esta disciplina de la medicina.

1. Introducción

La condición física se define como el estado del rendimiento psicofísico de una persona en un momento dado, e involucra los siguientes componentes: fuerza muscular, resistencia física, flexibilidad, coordinación y velocidad¹. Para lograr un buen rendimiento físico y nivel de salud, es necesario desarrollar y entrenar cada uno de estos componentes, idealmente de manera conjunta, mediante ejercicios o desafíos asociados a actos motores funcionales. A continuación, se presenta la definición conceptual de estos componentes.

- **Fuerza muscular (*muscular strength or muscular resistance*)**

El concepto de fuerza se define como la “capacidad neuromuscular de soportar o vencer una sobrecarga”, o como “el conjunto de contracciones musculares que tienen como fin vencer, mantener o al menos generar la fuerza suficiente para superar una resistencia dada”^{2, 3}. Como se verá más adelante, la fuerza muscular se puede evaluar y/o medir a través del concepto de resistencia máxima.

- **Resistencia física (*physical endurance*)**

El concepto de resistencia física involucra la capacidad biológica para mantener la realización de una actividad física por un tiempo prolongado⁴. La energía necesaria para la resistencia física se obtiene a través del metabolismo que realizan las células musculares mediante la actividad mitocondrial, es decir, reacciones químicas en presencia de oxígeno; por esta razón, se cataloga la resistencia física como esfuerzos de carácter aeróbico.

- **Flexibilidad (*physical flexibility*)**

La flexibilidad es la capacidad conjunta del tejido muscular y las articulaciones para llegar a elongarse de manera suave y sencilla, sin restricciones ni dolor⁵. Esta magnitud viene dada no solo por el rango máximo de movimiento de todos los músculos que participan en un movimiento (flexibilidad muscular), sino también por la integridad anatómica de la articulación y la extensibilidad de los tejidos blandos periarticulares (flexibilidad articular). La flexibilidad depende, en gran parte, de la elasticidad muscular, definida como la capacidad de alargamiento y recuperación de la forma y posición muscular inicial; y de la movilidad articular, definida como el rango de movimiento máximo de una articulación.

- **Coordinación (*neuromuscular coordination*)**

La coordinación muscular es la capacidad que tienen los músculos esqueléticos para realizar una acción compleja de la manera más sincronizada, es decir, simultánea y sinérgica⁶. Los movimientos ocurren por contracción coordinada de la musculatura necesaria y se relaciona con la integración del sistema somatosensorial, sistema nervioso (a nivel cerebral y espinal) y sistema muscular esquelético. Para que un movimiento o un gesto deportivo, como un lanzamiento o un salto, sea realizado con una gran coordinación, se requiere que este sea hecho a una velocidad e intensidad correcta para dicha acción en cada instante. Para ello, se necesita previamente un aprendizaje y una automatización del acto motor.

- **Velocidad (*neuromuscular velocity*)**

La velocidad se define como la capacidad de realizar un ejercicio o acto motor en el menor tiempo posible³. Involucra, inevitablemente, la correcta interdependencia de los otros componentes de la condición física, ya que necesita una fuerza adecuada, resistencia física, flexibilidad motora y coordinación neuromuscular, dado principalmente por el aprendizaje en la realización del acto físico. También se ven involucrados aspectos genéticos, especialmente respecto a la proporción de los diferentes tipos de fibras motoras de cada sujeto. De ahí la frase: “Un maratonista se hace, mientras que un velocista nace”, haciendo alusión a los rendimientos tras el entrenamiento físico de cada componente de la condición física.

2. Términos estadísticos habituales en fisiología del ejercicio

La estadística involucra aspectos de la metodología de investigación, descripción, análisis de datos y variables principalmente cuantitativas o numéricas; sin embargo, no son necesariamente excluyentes de la metodología cualitativa, que tiene la finalidad de contrastar hipótesis y predecir resultados o probabilidades, entre otros aspectos.

2.1 Variables independientes y dependientes

Una variable es simplemente una característica observable de un fenómeno que puede variar en el tiempo por sí sola o en respuesta a otra situación. Las variables que estén presentes en la pregunta de investigación deben usarse para plantear los objetivos de la investigación y la hipótesis cuando corresponda. Las variables se pueden dividir en dos tipos:

- **Variables independientes**, las cuales pueden ser manipuladas o cambiadas en orden de determinar la relación que poseen con las de tipo dependiente.
- **Variables dependientes**, que generalmente se evalúan antes y después de la modificación de la variable independiente, dando un valor estimado o medido a través del comportamiento de la variable a modificar “libremente”.

En la representación gráfica de un estudio estándar, la variable independiente se ubica en el eje X, o eje de las abscisas, en el gráfico X versus Y. En la relación causa-efecto, la variable independiente sería la causa. La variable dependiente, ubicada comúnmente en el eje Y, o de las ordenadas en el gráfico, en general se evalúa antes y después de la modificación de la variable independiente, o a lo largo de un estudio longitudinal. El valor de la variable dependiente es estimado o medido a través del comportamiento de la variable a modificar “libremente”. En la relación causa-efecto, la variable dependiente sería el efecto.

Todas las variables requieren ser definidas, de manera que cada investigador que lea la metodología logre identificar y comprender cada una de estas y la participación que tendrán en el estudio. Existen dos tipos de definición de variables: una conceptual, que se refiere a la definición con palabras de lo que para los investigadores significan las variables estudiadas; y la una operacional, en donde se debe definir cómo y con qué se medirá o registrará la variable en cuestión.

- **Clasificación de variables**

Otro aspecto importante que se debe considerar cuando se mencionan las variables de un estudio es el tipo y forma o escala de medición que se emplea en cada una de ellas. Las variables cuantitativas son aquellas que se describen a través de números, es decir, existe o implica un orden jerárquico entre los elementos de la escala, y la cantidad y magnitud del intervalo entre cada uno de ellos, debe ser igual. A su vez, las variables cuantitativas se miden en escala intervalar o de razón; para fines prácticos, la gran diferencia entre las variables con escala de medición en intervalos y de razón es que estas últimas contemplan la presencia de valor cero absoluto, que significa

la ausencia de la variable —por ejemplo, frecuencia cardiaca, goles de un partido de futbol, etc.—, mientras que las primeras no contemplan la ausencia absoluta de la variable —por ejemplo, la temperatura expresada en grados Celsius, en donde el valor de 0 °C no representa la ausencia de calor, sino solo un punto de referencia—. Las variables cuantitativas, además, se pueden diferenciar si son continuas, en las que teóricamente existen valores infinitos entre unidades adyacentes (p. ej.: talla), o discretas, en donde no existen valores posibles entre unidades adyacentes (p. ej.: número de hijos).

Otro tipo de variables son las cualitativas, las que se definen por categorías y no por valores numéricos. Este tipo de variables suelen corresponder a dos tipos de escalas, las nominales —como el país o región de origen, la ocupación, el deporte practicado o el sexo— y las ordinales, que supone una jerarquía de valores; por ejemplo, el nivel educativo, el estrato socioeconómico o el medallero en un evento deportivo (p. ej.: oro, plata y bronce).

3. Análisis de datos

Cuando se desea describir la información de la muestra de un estudio o investigación, es necesario conocer los conceptos involucrados en la presentación de los datos. Para ello, es importante comprender los conceptos estadísticos denominados de tendencia central y de dispersión.

3.1 Estadística de tendencia central

La estadística de tendencia central trata de representar con un solo valor dónde se encuentra la mayoría de los datos presentes. Los conceptos involucrados son:

- **Moda (*mode*):** es el valor o dato que más se repite para una variable dentro de una muestra. Cuando un grupo de datos tiene dos modas, se llama bimodal. Se utiliza principalmente para variables nominales, ya que no se pueden realizar otros cálculos estadísticos.
- **Mediana (*median*):** representa aquel valor de una muestra que se encuentra por sobre y bajo el 50% de la muestra, es decir, el punto en el cual la mitad de los datos son mayores y la otra mitad son menores. Para su cálculo, los valores de las variables se ordenan de menor a mayor y se ubica el dato que divide la muestra en dos partes iguales. Es una medida útil en variables ordinales, intervalares y de razón, siendo en la cual se presentan los datos cuando la muestra evidencia una distribución no normal, es decir, los datos tienden a agruparse en ciertos valores.

- **Media o promedio (*mean*):** es la medida de tendencia central más común y vista en artículos científicos. Como considera todos los datos de una muestra, es muy sensible a valores extremos. Solo debe usarse para mostrar los datos de las variables de un estudio cuando estos evidencien una distribución normal, es decir, cuando los datos se encuentren equilibrados (cuando existe igualdad de distribución de los datos, tanto por encima como por debajo del promedio).

3.2 Estadística de dispersión

La estadística de dispersión usualmente acompaña a las estadísticas de tendencia central indicando qué tan variables son los datos de la muestra. Suponga el siguiente ejemplo:

Variable	Día	Hora						
		08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
Frecuencia cardíaca (lpm)	1	80	80	80	80	80	80	80
Frecuencia cardíaca (lpm)	2	85	75	80	90	70	84	76
Frecuencia cardíaca (lpm)	3	60	85	80	80	80	75	100

Si calcula y entrega un informe en donde utilice el promedio o media aritmética como medida de tendencia central (sin considerar si es correcto o no), en todos los conjuntos de datos obtendrá 80 lpm. Sin embargo, al revisar con mayor detalle los números, se dará cuenta de que 80 lpm no es muy representativo del total de los valores recogidos en los diferentes días, ya que existen valores más o menos cercanos a este. Para guiar y presentar adecuadamente la entrega de información de los valores obtenidos es que se utilizan las medidas de dispersión.

Dentro de las medidas de dispersión, se pueden mencionar a las siguientes:

- **Variación, recorrido o rango (*range*):** es la diferencia entre el valor máximo y mínimo medido de una variable.
- **Rango intercuartílico (*interquartile range*):** indica la diferencia entre el valor que ocupa el percentil 25 y 75 de la muestra de valores, llamados también primero y tercer cuartil, respectivamente. Es el valor de dispersión que debe utilizarse cuando, en una muestra, los valores muestran una distribución no normal, por tanto, se debe acompañar del valor de mediana como medida de tendencia central. En otras palabras, indica qué tan lejos de la mediana se debe ir, tanto por arriba como por debajo, antes de recorrer la mitad de los valores del conjunto de datos.
- **Desviación estándar o desviación típica (*standard deviation*):** informa de la media o promedio de distancias que tienen los datos respecto de su promedio o media aritmética. Se utiliza acompañando a la variable media, por tal motivo, es útil siempre cuando la distribución de la muestra sea normal.
- **Varianza (*variance*):** es el valor de la desviación estándar al cuadrado, y por tal motivo siempre es un valor positivo. No es conveniente usarla cuando existen valores considerados atípicos o muy distantes de la mediana.

Un último estadígrafo útil por considerar al momento de presentar el resumen de los datos de una investigación es el coeficiente de variación (*coefficient of variation*, COV), ya que permite comparar dos conjuntos de datos que usen unidades de medición diferentes (p. ej.: talla, medida en centímetros; y peso, medido en kilos). Una forma de hacerlo es mediante este coeficiente, el cual se define como la desviación estándar dividida por la media o promedio, y luego multiplicada por 100.

Estudio de la relación entre dos variables:

- **Correlación (*correlation*)**

El análisis de la correlación involucra la observación de la interrelación entre las variables de los ejes X e Y. Una vez que se aprecia visualmente, es decir, posterior a la observación del gráfico de correlación, que en efecto existe relación entre las variables a evaluar, se realiza el análisis del valor de dicha correlación.

Para variables con características numéricas o continuas —por ejemplo, peso corporal, edad en años, consumo de oxígeno, talla, etc.—, la técnica de regresión lineal que más se utiliza es el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson (*r*), mientras que en aquellos casos en los cuales se requiera evaluar la correlación entre variables con carácter no numérica, es decir, de orden (ordinal) o categórico —por ejemplo, dolor o fatiga muscular mediante la escala visual análoga, categoría de peso corporal (sobrepeso, obesidad, etc.)—, se utiliza la correlación de Spearman (*rho*).

Para ambos casos, el valor de *r* o *rho* varía entre -1.0 y +1.0, dependiendo si es una correlación negativa o positiva, respectivamente. Cuanto más cercano el valor de *r* a ± 1.0 , es más fuerte la correlación entre las variables evaluadas, y si es más cercana a 0 (cero), será una menor o nula correlación.

Una correlación positiva o directa indica que cuando una de las variables aumenta, la otra también lo hace, mientras que una correlación negativa o inversa se da cuando una variable aumenta y la otra disminuye (figura 1).

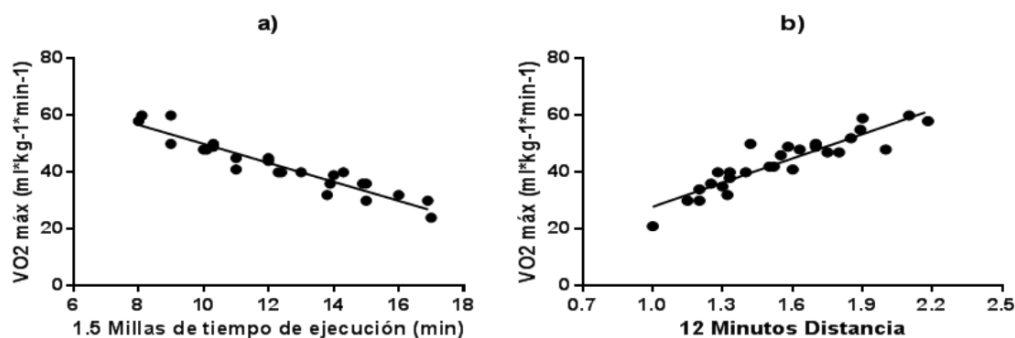


Figura 1. a) Correlación inversa o negativa que existe entre el valor de consumo de oxígeno máximo y la prueba de velocidad de 1.5 milla ($r = -0.88$). b) Correlación positiva o directa entre el valor de consumo de oxígeno máximo y la prueba de resistencia física de Cooper ($r = 0.91$).

4. Evaluación de calidad de las mediciones

Cualquier método o herramienta estandarizada de evaluación de los parámetros de la condición física debe cumplir con estos tres criterios:

4.1 Confiabilidad (*reliability*): se entiende por confiabilidad al grado en que una técnica recoge las mismas respuestas cada vez que se utiliza, o también, el grado en que el diseño o método de estudio lleva a los mismos resultados cada vez que se ejecuta. Por ejemplo, cuando se obtienen resultados similares de una prueba o *test* en dos momentos de ejecución distintos, se obtendrá una correlación alta de los resultados.

4.2 Objetividad (*objectivity*): es similar a la confiabilidad, pero menciona la habilidad o capacidad de una prueba o *test*, de entregar resultados similares cuando es realizado por diferentes evaluadores. Usualmente, se asimila al concepto de confiabilidad interobservador o interexaminador. Por ejemplo, una alta objetividad de una prueba se puede observar al graficar la correlación de valores de porcentaje de grasa de una muestra mediante la técnica de pliegues cutáneos realizada por dos diferentes evaluadores.

4.3 Validez (*validity*): es la capacidad de una prueba para medir exactamente lo que pretende medir. Existen dos tipos de validez en el método científico, la validez interna, en donde los resultados realmente reflejan los fenómenos de estudio, y la validez externa, la cual hace alusión al grado en que estos son generalizables a una población. Los valores de correlación para calificar una validez adecuada no son tan elevados como los que se necesitan para una adecuada confiabilidad.

A continuación, la tabla 1 presenta valores a considerar para interpretar el nivel de cada una de las características mencionadas anteriormente.

Tabla 1. Categorización sugerida para los diferentes niveles de confiabilidad y validez

Categoría para la confiabilidad de la prueba	Coeficiente de correlación	Categoría para la validez de la prueba	Coeficiente de correlación
Alta confiabilidad	.90 - 1.00	Alta confiabilidad	.80 - 1.00
Buena confiabilidad	.80 - .89	Buena confiabilidad	.70 - .79
Regular confiabilidad	.70 - .79	Regular confiabilidad	.60 - .69
Pobre confiabilidad	< .70	Pobre confiabilidad	< .60

5. Métodos gráficos para la presentación de datos

Si bien los datos pueden presentarse solo mediante los estadígrafos mencionados anteriormente, es muy común ver en los diferentes artículos científicos que estos se representan a través de gráficos.

Algunos de los gráficos más usados son:

- **Gráfico de barras (*bar graph*):** muy utilizado para variables nominales u ordinales. Presenta un eje X, en donde aparece la categoría de la variable, y un eje Y, en el que aparece la frecuencia absoluta. Muchas veces, en la parte superior de cada barra aparece una línea vertical delimitada por dos pequeñas líneas horizontales. Estas últimas señalan los valores de desviación estándar y, por lo general, representan dos veces el valor de desviación estándar. Esto es muy lógico y adecuado, ya que, en una investigación con distribución normal de datos, estos deberían presentarse con media o promedio y desviación estándar, pero lo importante de graficar los datos con el valor de dos desviaciones estándar es el hecho de que con ello se representa al 96% de la muestra (figura 2).

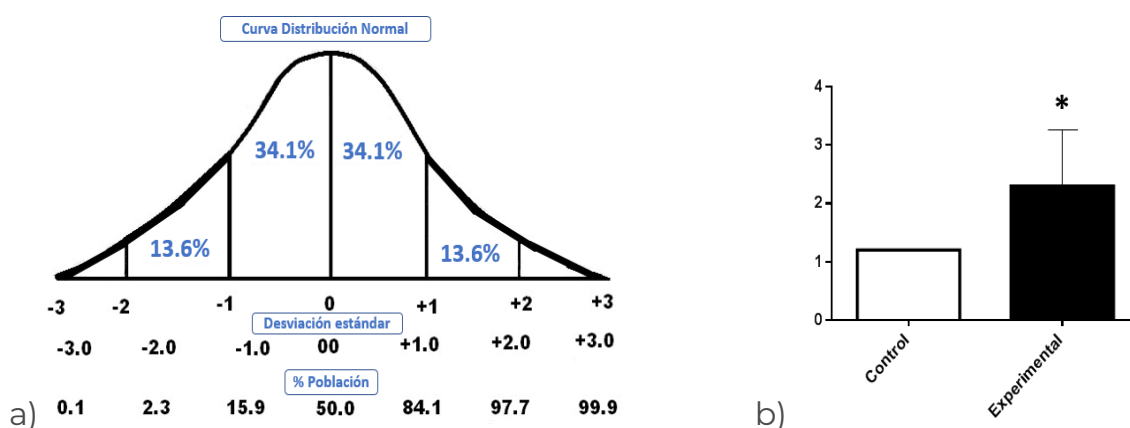


Figura 2. a) Representación gráfica de la curva de distribución normal junto al porcentaje de la población involucrada. b) Representación de un gráfico de barras con desviación estándar.

- **Gráfico de cajas y bigotes (boxplots or box and whiskers):** se puede utilizar para variables ordinales y cuantitativas. En el eje Y está la escala de los distintos valores de la variable que se grafica. Está compuesto por una caja cuyos límites superior e inferior representan el rango intercuartílico. La línea del medio representa la mediana de los datos. Por sobre y por debajo de la caja se ubican unas líneas verticales que se conocen como barbas o bigotes, las que se ubican a una distancia equivalente a 1.5 veces el rango intercuartílico. Cuando el dato más extremo está a una distancia menor, la barba se ubica en el último valor posible. Los valores que quedan por fuera de las barbas se conocen como valores extremos, u *outliers*, y quedan representados por puntos individuales. Como se puede apreciar, cuando los datos de una investigación presentan una distribución no normal y se utilizan los estadígrafos de mediana y rango intercuartílico, estos deben representarse mediante los gráficos de cajas y bigotes (figura 3).

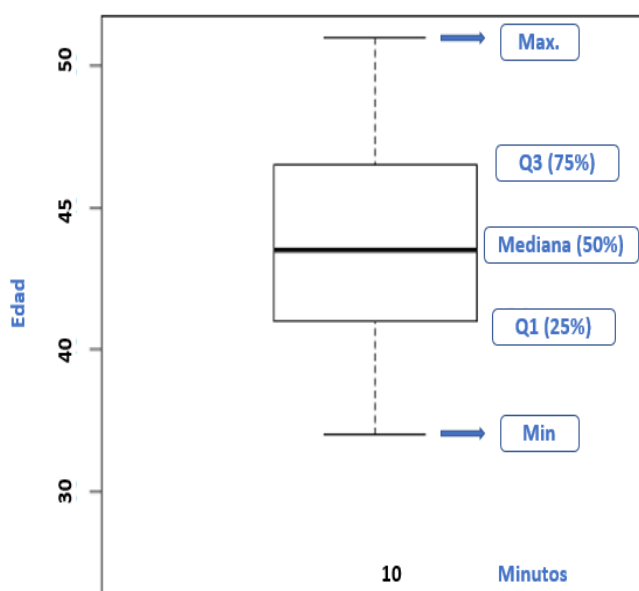


Figura 3. Representación de un gráfico de cajas y bigotes.

6. Terminología de evaluación y análisis estadísticos

6.1 Comparaciones

Cuando se realizan investigaciones, las hipótesis buscan conocer si hay diferencias entre medidas repetidas en un mismo grupo de sujetos o si hay diferencias significativas al comparar grupos con diferentes intervenciones.

Para probar estas hipótesis, se utilizan diferentes pruebas estadísticas (contraste de hipótesis). Las técnicas por aplicar dependerán del tipo de variables, de si los datos evidencian una distribución normal, y también del número de mediciones o grupos que se comparan.

A continuación, se presentan los pasos y nombres de las diferentes pruebas estadísticas más comunes para el contraste de hipótesis cuando se comparan grupos. Los pasos por seguir, desde el punto de vista metodológico, son:

- a) Identificar qué tipo de escala de medición usa las variables.
 - a.1) Ordinal o nominal: → Usar pruebas no paramétricas.
 - a.2) Intervalar o de razón: → Usar pruebas de normalidad.

- b) En el caso de variables intervalares o de razón, siempre hay que evaluar normalidad de los datos. Para esto, es común usar la prueba de normalidad Shapiro-Wilk. Cabe mencionar que cuando los datos presentan similitud en el valor de moda, mediana y media, es porque los datos presentan una distribución normal.

c) Considerar las siguientes pruebas estadísticas para comparar grupos.

Así, para variables intervalares o de razón:

c.1) Si evidencian una distribución normal, usar pruebas paramétricas:

Dos muestras → t de Student.

Tres o más muestras → Análisis de varianza (ANOVA).

c.2) Si evidencian una distribución no normal, usar pruebas no paramétricas:

Dos muestras → U de Mann Whitney.

Tres o más muestras → Kruskal-Wallis (ANOVA on ranks).

d) Para variables nominales dicotómicas, es conveniente conocer si:

d.1) Existe asociación entre variables → Chi-cuadrado.

d.2) Se compara la proporción de cada categoría → Binomial exacta.

A continuación, se presenta la tabla 2 que muestra la prueba o *test* estadístico a usar para diferentes contextos:

Tabla 2. Relación y comparación entre poblaciones muestrales

Número de observaciones	Contraste o relación	Grupos de datos	Análisis PARAMÉTRICO	Análisis NO PARAMÉTRICO
Datos pareados	Relación entre dos variables discontinuas			Prueba χ^2 Prueba exacta de Fisher (cuando frecuencia <5)
	Una sola variable	Dos grupos	t de Student	Mann-Whitney
		N grupos	One-way ANOVA	Kruskal-Wallis
	Relación lineal entre dos variables discontinuas		Coeficiente de correlación de Pearson; Modelo de regresión lineal	Coeficiente de correlación de Spearman; Modelo de regresión lineal
Datos sin aparear	Relación entre dos variables discontinuas	Dos grupos		McNemar
		N grupos		Cochran
	Una sola variable	Dos grupos	t de Student	Wilcoxon
		N grupos	Two-way ANOVA	Friedman

Referencias

1. Pate RR. The evolving definition of physical fitness. *Quest* [Internet]. 1988 [cited 2021 Mar 15];40(3):174–9. Available from: <https://shapeamerica.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00336297.1988.10483898>
2. Kim YH, Kim K II, Paik NJ, Kim KW, Jang HC, Lim JY. Muscle strength: A better index of low physical performance than muscle mass in older adults. *Geriatr Gerontol Int* [Internet]. 2016 May 1 [cited 2021 Mar 15];16(5):577–85. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/ggi.12514>
3. Wilkie DR. The relation between force and velocity in human muscle. *J Physiol* [Internet]. 1949 Dec 31 [cited 2021 Mar 15];110(3–4):249–80. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15406429/>
4. Caspersen C, Powell KE, Christenson GM. Physical activity and physical fitness: Definitions and distinctions for health-related research. *Public Health Rep* [Internet]. 1985 [cited 2021 Mar 15];100(2):126–31. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1424733/>
5. Harris ML. Flexibility. *Phys Ther* [Internet]. 1969 Jun 1 [cited 2021 Mar 15];49(6):591–601. Available from: <http://academic.oup.com/ptj/article/49/6/591/4595881>
6. Pollock AS, Durward BR, Rowe PJ, Paul JP. What is balance? *Clin Rehabil* [Internet]. 2000 Aug 1 [cited 2021 Mar 15];14(4):402–6. Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1191/0269215500cr342oa>



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

CAPÍTULO 2:

DETERMINANTES DE LA EVALUACIÓN DE LA COMPOSICIÓN CORPORAL

Autor:

Felipe A. Contreras Briceño

RESUMEN

Un aspecto relevante que hay que considerar para determinar el estado físico de un deportista es conocer su composición corporal y el porcentaje de masa magra y grasa susceptible de cambiar con el entrenamiento. Existen diferentes métodos para evaluar esta característica, algunas más sencillas y factibles de desarrollar por personal capacitado, mientras que otras son de elevado valor económico, pero con mayor exactitud. En este capítulo se presenta la metodología más usada en la práctica profesional para evaluar el estado de composición corporal en deportistas. El objetivo de incluir esta temática en este manual de estudio es valorar esta metodología y así lograr su incorporación en forma rutinaria en el quehacer de profesionales de la salud relacionados a la actividad física y el deporte.

1. Introducción

La antropometría es la ciencia que estudia las medidas del cuerpo humano con el fin de establecer y evaluar posibles diferencias entre individuos o en un mismo sujeto a lo largo del tiempo. Es una técnica de bajo costo, portátil y aplicable a toda la población. Entrega resultados respecto del estado nutricional y de salud de los individuos. El investigador William Ross desarrolló el concepto de cineantropometría como “el estudio del tamaño, forma, proporcionalidad, composición, maduración biológica y función corporal, con objeto de entender el proceso del crecimiento, el ejercicio, el rendimiento deportivo y la nutrición”^{1, 2}. La principal diferencia entre los conceptos de cineantropometría y antropometría está dada por el prefijo “cine”, el que refleja el aspecto dinámico del estado morfológico de un sujeto. De esta manera, a través del uso del término cineantropometría, se consideran tanto factores genotípicos (factores hereditarios) como fenotípicos (factores medioambientales) en la influencia de la forma y estructura de una persona.

La cineantropometría considera la medición de variables antropométricas lineales, destacando aquellas de índole general, como peso y talla, pliegues cutáneos, perímetros corporales, diámetros corporales y longitudes, y alturas. La obtención de estas variables permite, mediante su incorporación en diversas ecuaciones, el desarrollo de las tres áreas de la cineantropometría: i) composición corporal, ii) somatotipo, y iii) proporcionalidad humana.

2. Técnica de medición antropométrica

Como la evaluación antropométrica o cineantropométrica es realizada mediante el uso de diversos instrumentos, los que precisan una alta capacidad en su manejo y aplicación, es extremadamente necesario estandarizar las técnicas de evaluación, disminuyendo con ello, el error técnico al momento de las mediciones. Para hacer frente a esta necesidad, la Sociedad Internacional para Avances de la Cineantropometría (*International Society for Advancement in Kinanthropometry*, ISAK)¹ propone una normativa de los procesos de evaluación, cuyos lineamientos generales se exponen a continuación:

- **Consentimiento informado:** es considerado un principio obligatorio en la evaluación antropométrica, y corresponde a una carta informativa donde se expresan las características de la evaluación a realizar, tales como: vestimenta, procedimientos, variables antropométricas a evaluar, tratamiento de los datos y objetivos de la evaluación. Este documento debe ser leído y firmado por el sujeto, y en el caso de ser menor de 18 años, deberá ser firmado por el tutor o apoderado del evaluado.
- **Características del espacio físico:** el lugar en donde se lleve a cabo la evaluación cineantropométrica tiene que ser amplio, privado, con ventilación y adecuada iluminación, de tal forma que se den todas las condiciones de comodidad y correcto manejo del antropometrista y del evaluado.
- **Posición de la evaluación:** el evaluado debe adquirir una posición bípeda erguida y relajada, su cabeza tiene que estar en el plano de Frankfort (figura 1) con los brazos a los costados del cuerpo, sus talones juntos y los pies levemente separados.

- **Condiciones iniciales del evaluado:** aquel sujeto que será evaluado debe cumplir ciertos requerimientos, destacando: i) evaluación a primera hora de la mañana posterior a la evacuación, ii) no haber entrenado, iii) no haber ingerido alimentos de manera abundante, y iv) no presentar condiciones que limiten la evaluación (lesiones, edemas, hipersensibilidad, alergias, etc.).



Figura 1. Posición de la cabeza en el plano de Frankfort.

3. Material antropométrico

Para llevar a cabo la evaluación morfológica de un sujeto, es necesario contar con una serie de materiales que permitirán medir las diferentes variables antropométricas. El conjunto de material antropométrico es conocido como “kit antropométrico”, el que considera básicamente los siguientes elementos (figura 2):

- **Balanza:** para la medición de la masa corporal total, con una precisión cercana a los 100 gramos.
- **Estadiómetro con una escuadra de base plana:** utilizado para medir la talla en posición bípeda y sentada, con una precisión de 0.1 cm.
- **Cinta antropométrica:** permite evaluar los perímetros corporales, con una precisión de 0.1 cm.
- **Calibres de pliegues cutáneos:** es utilizado para la evaluación de los pliegues adiposos subcutáneos, con una precisión de entre 0.1 y 0.5 mm.
- **Antropómetros y calibres deslizantes:** son utilizados para la evaluación de las longitudes y los diámetros corporales. Tiene una precisión de 0.1 cm.
- **Caja antropométrica:** corresponde a una banca con dimensiones de 50 cm de alto, 40 cm de ancho y 30 cm de profundidad.

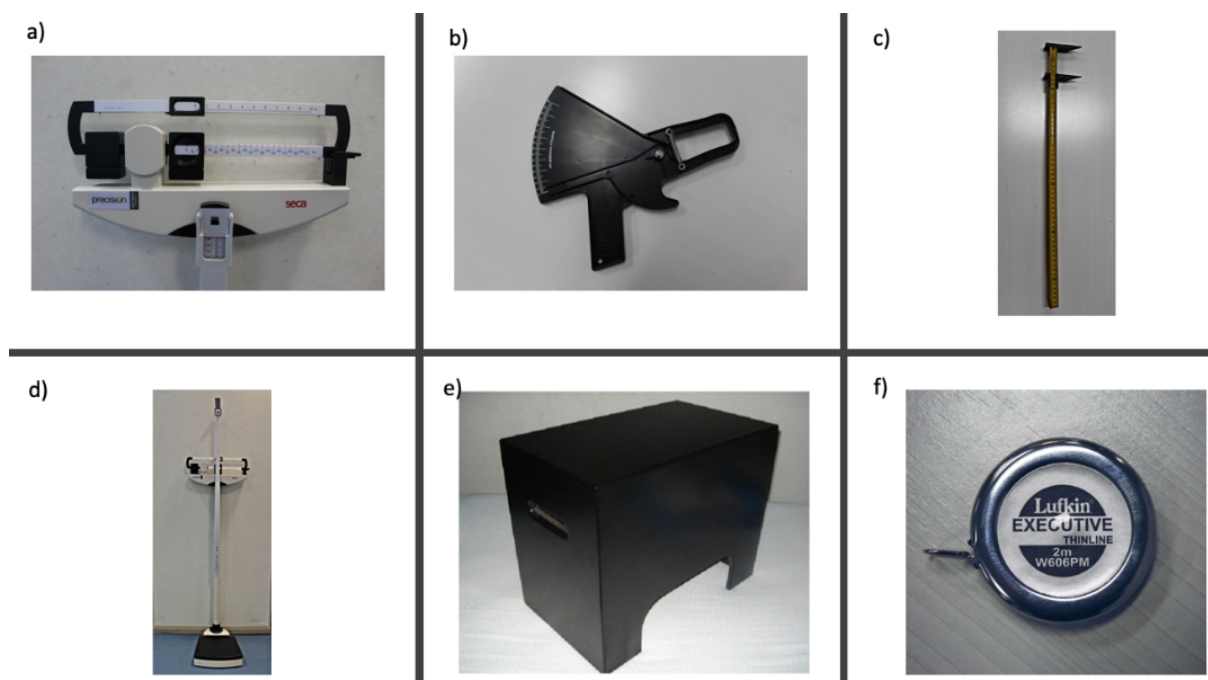


Figura 2. Material antropométrico: a) balanza; b) caliper de pliegue cutáneo; c) antropómetro con calibre deslizante; d) estadiómetro; d) caja antropométrica; f) cinta de medir.

4. Marcaje corporal: Puntos anatómicos de máxima referencia

Con la finalidad de lograr una mayor objetividad en la medición de las variables que se deseen estudiar, se considera previamente un proceso de marcaje del cuerpo, con la intención de identificar el sitio preciso en donde se dispondrá el material antropométrico. Estas marcas, con una longitud aproximada de 1 cm y un ancho máximo de 2 mm, se realizan mediante el uso de un lápiz dérmico (el que permite ser borrado fácilmente con el uso de crema y algodón). A continuación, se señalan aquellos puntos anatómicos de máxima referencia, necesarios para la estimación de los parámetros morfológicos comúnmente utilizados en salud.

a) Cabeza

- o Vertex®: punto más superior del cráneo cuando este se localiza en el plano de Frankfort.
- o Tragon®: punto más alto del conducto auditivo externo.
- o Orbitale®: corresponde al margen inferior de la órbita ocular.

b) Miembro superior

- o Punto acromiale®: corresponde al punto más lateral y superior del proceso acromial.
- o Punto radiale®: punto más proximal y lateral de la cabeza del radio.
- o Punto medio acromio-radial®: punto medio entre los puntos acromiale y radiale.
- o Sitio para el pliegue tricpital®: posterior al marcaje del punto medio acromio-radial se realiza una proyección horizontal

hacia la parte posterior del brazo, marcando una línea de aproximadamente 1 cm. Luego, se completa la cruz del sitio de marcaje, mediante la proyección vertical del olecranon, lo que permite que este pliegue se localice en la zona más posterior del brazo.

- o Sitio para el pliegue bicipital®: posterior al marcaje del punto medio acromio-radial se realiza una proyección horizontal hacia la parte anterior del brazo, marcando una línea de aproximadamente 1 cm. Luego, se completa la cruz del sitio de marcaje a través de la proyección vertical del tendón del músculo bíceps; de esta manera se asegura que la zona de evaluación esté en la parte más anterior del brazo.

c) Tronco

- o Punto subescapulare®: punto más inferior del ángulo inferior de la escápula (solo se debe marcar un punto, y no una línea, como en el resto de los puntos anatómicos).
- o Punto mesoesternale®: punto localizado en la zona media del esternón, a la altura de la cuarta costilla.
- o Punto iliocristale®: corresponde al punto más alto de la cresta ilíaca, la que debe ser coincidente con la línea media axilar.
- o Punto iliospinale®: corresponde al punto donde se localiza la espina iliaca anterosuperior.
- o Sitio para el pliegue subescapulare®: desde el punto subescapulare se traza una línea oblicua con una orientación de 45° hacia abajo y afuera del cuerpo del evaluado. Posteriormente, y siguiendo la línea oblicua realizada, se completa la cruz marcando una perpendicular a los 2 cm del punto subescapulare.

- o Sitio para el pliegue de la cresta ilíaca®: está localizado por arriba del punto iliocristale. Se debe poner el pulgar sobre el punto iliocristal y realizar una apertura con el dedo índice de aproximadamente 6 cm, para luego tomar un pliegue, el que naturalmente se manifiesta en forma oblicua. Una vez tomado el pliegue, se debe trazar una línea oblicua que lo divida en partes iguales. La cruz se completa al proyectar la línea media axilar sobre la línea marcada anteriormente.
- o Sitio para el pliegue supraspinale®: corresponde a la cruz que se forma entre la proyección horizontal anterior del punto iliocristale con la diagonal que se forma entre el pliegue axilar con el punto iliospinale.
- o Punto omphalion®: corresponde al punto donde se localiza el ombligo.
- o Sitio para el pliegue abdominal®: se debe tazar una horizontal hacia el hemicuerpo derecho del sujeto, teniendo como referencia el punto anatómico omphalion, para posteriormente marcar una vertical que se localice 5 cm (para un sujeto adulto) del mismo punto.

d) Miembro inferior

- o Punto inguinale®: corresponde a la zona media del pliegue que se forma entre el muslo y la pelvis cuando un sujeto realiza una flexión de la articulación coxofemoral.
- o Punto patelare®: punto localizado en la parte más superior de la patela, cuando el sujeto está con una flexión de la articulación de la rodilla de 90°.

- o Sitio para el pliegue del muslo frontal®: se debe marcar una horizontal en la zona media y anterior del muslo, a la altura de la distancia media entre los puntos inguinale y patelare. La vertical corresponde a la zona más anterior del muslo.
- o Sitio para el pliegue de la pantorrilla medial®: con el uso de la cinta antropométrica, se debe localizar el mayor perímetro de la pantorrilla, para posteriormente marcar una línea horizontal en la zona medial o interna de la pantorrilla. La línea vertical debe corresponder a la zona más medial del mismo segmento corporal.

5. Técnica de medición de las variables antropométricas

Con la clara intención de disminuir el error técnico de medición de un antropometrista, la ISAK establece protocolos de evaluación de las variables antropométricas, las que se detallan a continuación mediante la descripción general del proceso.

5.1 Variables generales

- **Masa corporal**

El sujeto deberá estar con el mínimo de ropa posible. Los valores más estables para el control de esta variable se obtienen en la mañana, posterior a la evacuación. El sujeto se posiciona en la zona central de la parte superior de la balanza, con los pies juntos, sin generar movimiento para evitar posibles oscilaciones en la escala de medida y errores en la lectura. La unidad de medida utilizada en esta variable es el kilogramo.

- **Estatura o talla en posición bípeda**

Corresponde a la distancia entre el punto vértex y la superficie de apoyo, estando el sujeto en posición bípeda erguida, con los talones juntos. El método que se propone precisa la realización de una tracción del cráneo (tracción de las mastoides). Para llevar a cabo la evaluación es necesario contar con dos evaluadores, mientras uno realiza la tracción de las mastoides, el otro antropometrista dispone sobre el cráneo del evaluado la escuadra con base plana. Una vez que se adquiere la posición descrita, se le indica al evaluado que realice una inspiración máxima y se marca la zona inferior de la escuadra con base plana.

- **Pliegues cutáneos**

Los pliegues cutáneos consideran la medición de tejido adiposo subcutáneo, comprendiendo una capa doble, tanto de piel como de tejido adiposo subyacente. La evaluación de esta variable antropométrica suele ser compleja, y la variación del resultado obtenido en cada medida es común. Los pliegues habitualmente evaluados son: bicipital, tricipital, subescapular, de la cresta ilíaca, supraespinal, abdominal, del muslo frontal, y de pantorrilla medial (figura 3).

Dado lo anterior, se sugiere seguir las siguientes instrucciones:

- Revisar la calibración del plicómetro o calibrador de pliegues cutáneos.
- Ser preciso en el marcaje de los sitios para la evaluación de los pliegues cutáneos. Al tomar el pliegue cutáneo se debe considerar una separación entre los dedos índice y pulgar de 6 a 8 cm, procurando tomar solo piel y tejido adiposo, excluyendo la masa muscular. El sitio en donde se debe tomar el pliegue corresponde al lugar donde se realiza el marcaje del sitio correspondiente a cada pliegue; mientras que el instrumento se dispone a un centímetro de la tomada del evaluador.
- Establecer una angulación de 90° entre el instrumento y el pliegue cutáneo.
- Disponer el instrumento en la zona media del pliegue (ni profundo, ni superficial).
- Hacer lectura del valor que entrega el calibrador a los dos segundos de estar dispuesto sobre la piel.
- La reevaluación de los pliegues se debe llevar a cabo después de la realización del resto de las variables antropométricas, con la finalidad de dar el tiempo necesario al tejido adiposo para volver a su estado natural.



Figura 3. Pliegues cutáneos obtenidos mediante caliper.

- **Perímetros corporales**

Los perímetros corporales son evaluados mediante la cinta antropométrica, la que debe ser dispuesta sobre la piel con referencia a los puntos anatómicos de máxima referencia que corresponda. Se debe procurar no generar presión que provoque la formación de un pliegue. Por disposición general, al evaluar los perímetros corporales, la cinta debe estar paralela al suelo, excepto en el perímetro de la cabeza. La técnica para evaluar los perímetros utilizados habitualmente en salud se describe a continuación:

- o **Perímetro de cabeza:** es el máximo perímetro de la cabeza cuando la cinta se sitúa por encima de la glabella (punto medio entre las cejas) y perpendicular al eje de la cabeza, estando esta en el plano de Frankfort. Para este perímetro es necesario que el evaluador se disponga al costado del sujeto a evaluar.

- o **Perímetro de tórax:** medida de la circunferencia que rodea al tórax a nivel del punto mesoesternal, perpendicular al eje longitudinal del tórax. Se debe evitar que la cinta no esté dispuesta sobre la piel en la zona posterior del tronco.
- o **Perímetro de cintura:** corresponde a la circunferencia de la cintura localizado en el punto más estrecho que hay entre la última costilla y la cresta iliaca, siendo perpendicular al eje del cuerpo. Dadas las características de la evaluación, es necesario que el evaluador se disponga detrás o delante del evaluado.
- o **Perímetro de glúteo:** es el perímetro que se localiza a nivel de la máxima prominencia glútea, por lo que precisa que el evaluador se disponga al costado del evaluado y determine el sitio donde se aprecie la mayor prominencia de los glúteos con el sujeto en posición bípeda y con los talones juntos.

- **Composición corporal**

La composición corporal corresponde a una de las áreas de desarrollo de la cineantropometría, la que se relaciona con el fraccionamiento de la masa total de un sujeto en diversas masas parciales, la que puede ser en dos (bicompartimental), tres (tricompartimental), cuatro (tetracompartimental) y cinco componentes (pentacompartimental).

Los métodos utilizados para el logro del fraccionamiento del cuerpo humano pueden ser apreciados en la tabla 1.

Tabla 1. Métodos de estimación de la composición corporal.

Métodos	Técnicas
Directo	Dissección de cadáveres
Indirectos	Determinación del agua corporal total
	Tomografía axial computarizada
	Resonancia nuclear magnética
	DEXA
	Antropometría de cinco componentes
Doblemente indirectos	Antropometría de dos, tres y cuatro componentes
	Bioimpedancia eléctrica.

Para el fraccionamiento del cuerpo humano a través de los métodos antropométricos, se utilizan diversas ecuaciones, las que han sido elaboradas en base a un grupo de la población particular, considerando principalmente edad, sexo, etnia y actividad.

Las variables antropométricas son introducidas en las ecuaciones, las que pueden estimar la densidad corporal total, la grasa y adiposidad corporal. Algunas de estas ecuaciones se presentan a continuación:

- **Método bicompartimental**

Para poder aplicar este método es necesario incorporar los valores obtenidos de los pliegues cutáneos en ecuaciones que estiman la densidad corporal total del sujeto, para posteriormente esta nueva variable ser introducida en una ecuación que estima la grasa corporal total.

A continuación, se presenta la propuesta de densidad de Durnin y Womersley (1974)³ y la estimación de la masa grasa de Bhenke y Wilmore (1974)⁴:

Densidad corporal total (hombres 17 a 72 años de edad) = $1.1765 - 0.0744 \log$
(Pl. Bicipital + Pl. Tricipital + Pl. Subescapulare + Pl. Cresta Ilíaca)

Densidad corporal total (mujeres 16 a 68 años de edad) = $1.1567 - 0.0717 \log$
(Pl. Bicipital + Pl. Tricipital + Pl. Subescapulare + Pl. Cresta Ilíaca)

% Masa grasa (adultos) = $(5.053/d - 4.641) \times 100$

La calificación de normalidad o anormalidad en la cantidad (porcentaje) de contenido graso, se establece de acuerdo con la tabla 2:

Tabla 2. Clasificación del estado nutricional de un sujeto no atleta en base al porcentaje de grasa, utilizando un método bicompartimental.

	Hombres	Mujeres
Bajo peso	Bajo 8	Bajo 15
Óptimo	8-15	16-20
Sobrepeso I	16-20	21-25
Sobrepeso II	21-24	26-32
Obeso	Igual o superior a 25	Igual o superior a 33

- **Método pentacompartimental** (Kerr y Ross, 1986)⁵

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

- o $S\ ADIP = \text{sumatoria (TPSF + SSSF + SISF + ABSF + THSF + MCSF)}$
- o $Z\ ADIP = [S\ ADIP \cdot (170.18 / HT) - 116.41] / 34.79$

Donde:

116.41 = sumatoria de medias Phantom de los pliegues cutáneos

34.79 = sumatoria de los desvíos estándar Phantom para los pliegues cutáneos

TPSF = pliegue cutáneo del tríceps

SSSF = pliegue cutáneo subescapular

SISF = pliegue cutáneo supraespinal

ABSF = pliegue cutáneo abdominal

THSF = pliegue cutáneo frontal del muslo

MCSF = pliegue cutáneo de la pantorrilla media

HT = estatura del sujeto evaluado

$$M \text{ ADIP (kg)} = [(Z \text{ ADIP} \cdot 5.85) + 25.6] / (170.18 / HT)^3$$

Donde:

M ADIP = Masa adiposa (en kg)

Z ADIP = Score de proporcionalidad Phantom para la masa adiposa

25.6 = Constante del método para media de masa adiposa Phantom (en kg)

5.85 = Constante del método para desvío estándar de la masa adiposa Phantom (en kg)

HT = Estatura del sujeto evaluado

La clasificación morfológica del porcentaje de adiposidad que considera este método para un sujeto no deportista se aprecia en la tabla 3 (Laboratorio Biosystem, Buenos Aires, Argentina):

Tabla 3. Clasificación del estado nutricional de un sujeto recreacional en base al porcentaje de adiposidad, utilizando el método pentacompartimental.

SUJETOS RECREACIONALES		
Calificación	Hombres	Mujeres
Excelente	Menor a 18.9	Menor a 26.0
Bueno	18.9-23.1	26.0-28.0
Aceptable	23.2-27.5	28.1-30.0
Elevado	27.6-33.0	30.1-36.0
Muy elevado	Mayor a 33.0	Mayor a 36.0

- **Índice de masa corporal (IMC)**

Es una herramienta general muy utilizada para la estimación del estado nutricional de las personas, la que consiste en la división del peso corporal total (expresado en kilogramos) por la talla (expresado en metros) al cuadrado en posición bípeda.

$$\text{IMC} = \text{Peso (kg)} / (\text{Talla (m)})^2$$

La Organización Mundial de la Salud (OMS), en el año 1998, determina los valores del IMC que se asocian con la normalidad y anormalidad nutricional. Los puntos de corte que considera esta organización son los siguientes: bajo 18.4 = desnutrición o bajo peso; entre 18.5 y 24.9 = normopeso; entre 24.9 y 29.9 = sobrepeso, y superior a 30 = obesidad.

Referencias

1. ISAK - La Sociedad Internacional para el Avance de la Cineantropometría. [Internet]. [cited 2021 Mar 15]. Available from: <https://www.isak.global/>
2. Skinfold thickness and body fat. Nutr Rev. 1968;26(4):104–7.
3. Durnin JVGA, Womersley J. Body fat assessed from total body density and its estimation from skinfold thickness: measurements on 481 men and women aged from 16 to 72 Years. Br J Nutr [Internet]. 1974 Jul [cited 2021 Mar 15];32(01):77–97. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/4843734/>
4. Wilmore JH, Behnke AR. An anthropometric estimation of body density and lean body weight in young women. Am J Clin Nutr. 1970;23(3):267–74.
5. Ross WD, Crawford SM, Kerr DA, Ward R, Bailey DA, Mirwald RM. Relationship of the body mass index with skinfolds, girths, and bone breadths in canadian men and women aged 20–70 years. Am J Phys Anthropol [Internet]. 1988 [cited 2021 Mar 15];77(2):169–73. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3207166/>

Evaluación de la composición corporal

Objetivo de la actividad

Aplicar la técnica de evaluación antropométrica en un sujeto para determinar y clasificar el estado de la composición corporal.

Instrucciones

De acuerdo con lo revisado en este capítulo, realice una evaluación antropométrica a un compañero, el que debe considerar la totalidad de los datos que se detallan en la planilla de datos.

En base a los datos obtenidos en la evaluación de las variables antropométricas, realice los cálculos del estado morfológico de su compañero (debe determinar porcentaje de grasa, porcentaje de adiposidad e IMC) y determine el estado nutricional.

Ficha de evaluación antropométrica (proforma)

Datos generales

Evaluator/es _____

Nombre del
evaluado _____

Género _____ Edad _____ Modalidad deportiva _____

Tipo de actividad física _____

Fecha de medición ____/____/____ Fecha de nacimiento ____/____/____

Datos específicos

Variable general	Primera evaluación	Segunda evaluación	Tercera evaluación
Peso (kg)			
Talla (m)			

Pliegues cutáneos	Primera evaluación	Segunda evaluación	Tercera evaluación
Tricipital			
Bicipital			
Subescapulare			
Cresta iliaca			
Supraespinal			
Abdominal			
Muslo frontal			
Pantorrilla medial			

Perímetros corporales	Primera evaluación	Segunda evaluación	Tercera evaluación
Cabeza			
Tórax			
Cintura			
Cadera			



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

CAPÍTULO 3

DETERMINANTES Y MÉTODOS NO INVASIVOS DE EVALUACIÓN DE LA FUERZA MUSCULAR

Autores:

Felipe A. Contreras Briceño

Eduardo Moya Gallardo

RESUMEN

Dentro de las variables que conforman la condición física, el desarrollo de la fuerza muscular es fundamental para todas las disciplinas deportivas, considerando diferencias en virtud del tipo y modo de ejercicios realizados. Existen diferentes métodos para entrenar la fuerza, e independiente de cuál sea el más idóneo, todos deben antes evaluar en forma objetiva la fuerza en los grupos musculares que desean fortalecer. En este capítulo se presentan las bases fisiológicas y métodos para evaluar en forma objetiva la fuerza muscular, ya sea en deportistas altamente entrenados como en sujetos no habituados al ejercicio físico. Además, se presentan una serie de tablas con valores referenciales de normalidad con la finalidad de interpretar los valores obtenidos.

1. Introducción

La fuerza muscular es una de las cinco variables de las que depende la condición física de un individuo. Se define como el conjunto de contracciones musculares que tienen como finalidad vencer, mantener o al menos generar la fuerza suficiente para intentar superar una resistencia^{1, 2}. También se puede definir como la capacidad neuromuscular de soportar o vencer una sobrecarga. Ya que el concepto de fuerza muscular se relaciona con el fenómeno de contracción muscular, es conveniente mencionar los diferentes tipos de contracción muscular que se pueden realizar:

- **Contracción concéntrica**

Ocurre cuando un músculo desarrolla una tensión suficiente para superar una resistencia, de forma tal que este disminuye su longitud (acorta), es decir, los puntos de origen e inserción del grupo muscular se acercan. Un ejemplo de este tipo de contracción es cuando se lleva un vaso de agua a la boca y el músculo bíceps braquial realizaría un acortamiento al causar la flexión de codo.

- **Contracción excéntrica**

Se da cuando la forma de un grupo muscular se alarga pese a la contracción, es decir, cuando aumenta la distancia entre los puntos de origen e inserción muscular, aumentando su longitud. Por lo general, ocurre cuando la resistencia a vencer es mayor que la tensión ejercida por el grupo muscular determinado o cuando se frena un movimiento ejercido previamente. Un ejemplo de este tipo de contracción muscular es realizar ejercicio de bíceps braquial en la máquina de poleas cuando el codo vuelve controladamente a la posición de extensión, desde la flexión de codo.

- **Contracción pliométrica**

A diferencia de las contracciones concéntricas y excéntricas, este tipo de contracciones tienen dos ciclos: uno de estiramiento (excéntrica), donde los componentes elásticos del músculo desarrollan tensión, y otro de acortamiento (concéntrica), donde se le suma a la fuerza elástica del ciclo anterior el carácter contráctil de acortamiento. Un ejemplo de este tipo de contracción muscular es el saltar avanzando de manera repetida.

- **Contracción isométrica**

En este tipo de contracción muscular, el músculo permanece estático sin acortarse ni alargarse, es decir, la distancia entre los puntos de origen e inserción no se modifica mayormente. Sin embargo, aunque permanece estático, sí se genera tensión muscular.

Los tres primeros tipos de contracción muscular se enmarcan en el concepto de contracción dinámica o anisométrica, ya que la longitud del grupo muscular no permanece constante durante la contracción, sino que se modifica constantemente, a diferencia de lo que ocurre con el último tipo de contracción muscular denominada isométrica, ya que aquí la longitud del grupo muscular permanece constante o estacionaria.

2. Fuerza muscular dinámica

El ejercicio físico que involucra mayormente contracciones musculares de carácter dinámico, o también llamado anisométrico, es denominado en cierta literatura como “isotónico”, término que nos parece adecuado no homologar, ya que debe constreñirse a aquellas contracciones en la que la tensión se mantiene constante durante todo el movimiento. Este tipo de acciones solo se produce con la ayuda de máquinas especialmente diseñadas, pero en la vida real, cuando se realiza cualquier tipo de acción muscular y se engloba el concepto de fuerza, en ningún momento el tono muscular mantiene un valor fijo o estacionario, ya que se modifica por la propia variación de los ángulos de inserción o la longitud de los brazos de palanca. Por tal motivo, en este manual solo se utilizarán los términos de fuerza dinámica o anisométrica y fuerza estática o isométrica.

La idea de evaluar la fuerza dinámica ha existido desde los inicios de los Juegos Olímpicos, cuando a los participantes se les solicitaba lanzar lo más lejos posible una pelota de acero con la finalidad de lograr la clasificación a la participación. En 1873, el médico estadounidense Dudley Sargent, pionero en el área de la educación física, inició pruebas de fuerza dinámica en la Universidad de Harvard. Actualmente, muchos preparadores físicos evalúan la fuerza física en las salas de pesas a través del concepto de “peso libre”.

En este capítulo se abordará la descripción de evaluación de fuerza dinámica de varios grupos musculares, a través de mediciones directas e indirectas (valor predicho o estimado, respectivamente), utilizando el concepto de ejercicio con “peso libre”.

2.1 Marco teórico

Una de las maneras más usadas para evaluar la fuerza dinámica de un grupo muscular es considerando el concepto de “una repetición máxima (1 RM)” para un movimiento específico; por ejemplo, el ejercicio de *press* de banca (prensa de pecho)^{3, 4}. El concepto de 1 RM guarda relación con el máximo peso que un sujeto puede levantar solamente una vez. Este valor puede ser medido directamente a partir de un esfuerzo máximo, o puede ser indirectamente estimado a partir de un esfuerzo submáximo.

2.2 Medición directa de 1 RM

Para su correcta medición, el evaluador selecciona un peso determinado y le solicita al sujeto que lo levante adecuadamente⁵. Si el sujeto no puede levantar apropiadamente el peso determinado, se procede a disminuir el valor del peso o resistencia; luego de un intervalo de tiempo de reposo, se intenta por una segunda vez, y si el sujeto es capaz de levantar adecuadamente el peso dos veces, se detiene la prueba y se da nuevamente el intervalo de reposo. Posteriormente, se procede a un incremento leve del peso y se intenta nuevamente. Este proceso se repite hasta que el sujeto pueda levantar adecuadamente solo una vez el peso determinado.

Es importante considerar que es probable que el valor de peso obtenido de 1 RM de manera directa, puede no ser el real o el que se podría obtener en otro momento de evaluación, ya que se deben considerar temas como el número de intentos, el tiempo utilizado en la prueba, los errores en la estandarización de la maniobra, entre otros.

Otro aspecto importante por considerar es que la evaluación de fuerza mediante el concepto de 1 RM no está exento de posibles lesiones a cierto grupo de la población, especialmente en niños y adultos mayores; de hecho,

la Academia Americana de Pediatría y la Asociación Americana de Fuerza y Acondicionamiento Físico no recomiendan el uso de la evaluación de 1 RM en niños.

2.3 Medición indirecta de 1 RM

Si por alguna razón no es posible la medición de 1 RM de manera directa, su valor puede estimarse indirectamente conociendo el número repeticiones submáximas hasta que se alcance la fatiga muscular (RFM).

El valor de 1 RM puede evaluarse a partir de ecuaciones basadas en relaciones lineales o exponenciales entre el número de repeticiones hasta la fatiga (RFM) y el porcentaje de 1 RM (% 1 RM). El valor de 1 RM se puede estimar mediante mediciones del número RFM a intensidades entre el 75% y el 95% de 1 RM, y de manera extraordinaria se puede extender a intensidades inferiores; por ejemplo, 60% de 1 RM. Es conveniente mencionar que se recomienda usar cargas de peso libre que resulten en no más de 10 RFM ($\pm$ 75% de 1 RM).

A continuación, en la figura 1 se muestra la relación entre el número de RFM y el porcentaje de 1 RM que involucra aplicando un modelo lineal y otro exponencial.

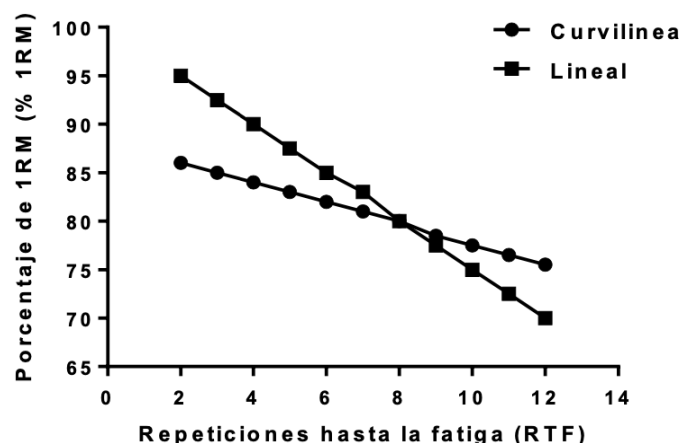


Figura 1. Relación lineal y exponencial (curvilínea) entre el número de repeticiones hasta la fatiga muscular y el porcentaje de una repetición máxima.

Si se considera el método basado en una relación lineal entre % 1 RM y RFM, se acepta que el porcentaje de carga de 1 RM disminuya cerca de un 2.5% por cada aumento en el número de RFM. Es decir, si el valor de 1 RM se expresa porcentualmente, 1 RM será igual a 100%, mientras que un 80% de 1 RM, es similar a realizar 8 RFM, ya que por cada número de RFM se asume que se pierde un 2.5 % de RM. Un ejemplo de lo anterior es la evaluación de fuerza de manera directa del grupo muscular bíceps braquial. Por ejemplo, un sujeto de 20 años es capaz de levantar correctamente solo una vez el valor de 10 kg mediante el uso de mancuernas (peso libre), por lo tanto, se puede aseverar que 10 kg corresponden a lo denominado una resistencia máxima o 1 RM. Si otro día se quiere evaluar al mismo sujeto mediante el método indirecto, considerando una relación lineal entre los conceptos de 1 RM y RFM, uno podría solicitarle que levante 8 kg, y debería esperar que el mínimo de veces que el sujeto logra realizar la acción (RFM) sería ocho veces, ya que por cada vez que levanta el peso se “pierden” cerca de 2.5% del valor de 1 RM, es decir, en ocho veces se “pierden” 20% del valor de 1 RM, es decir, en 8 RFM se obtiene un 80% RM, lo que correspondería a esos 8 kg.

Otro método de evaluación indirecta de 1 RM es mediante la relación entre 1 RM y RFM con la relación curvilínea o exponencial. Este método es muy similar al método lineal, salvo que matemáticamente para la estimación del porcentaje de 1 RM (% 1 RM) se basa sobre el exponente del número de RFM. De esta manera, el método exponencial estima valores de 1 RM ligeramente más bajo a un menor número de RFM y ligeramente más alto a un número mayor de 8 de RFM (ver figura 1).

Para la actividad práctica se utilizará el ejercicio *press de banca* (figura 2), ya que muchos músculos se ven involucrados en el acto motor; los principales son: pectoral mayor, deltoides anterior, coracobraquial y tríceps braquial. La vía metabólica principalmente involucrada para realizar esta fuerza muscular es la vía del fosfágeno, ya que el acto motor no involucra más de diez segundos. Por este motivo, se cataloga este ejercicio dentro de la categoría anaeróbica^{4,6}.

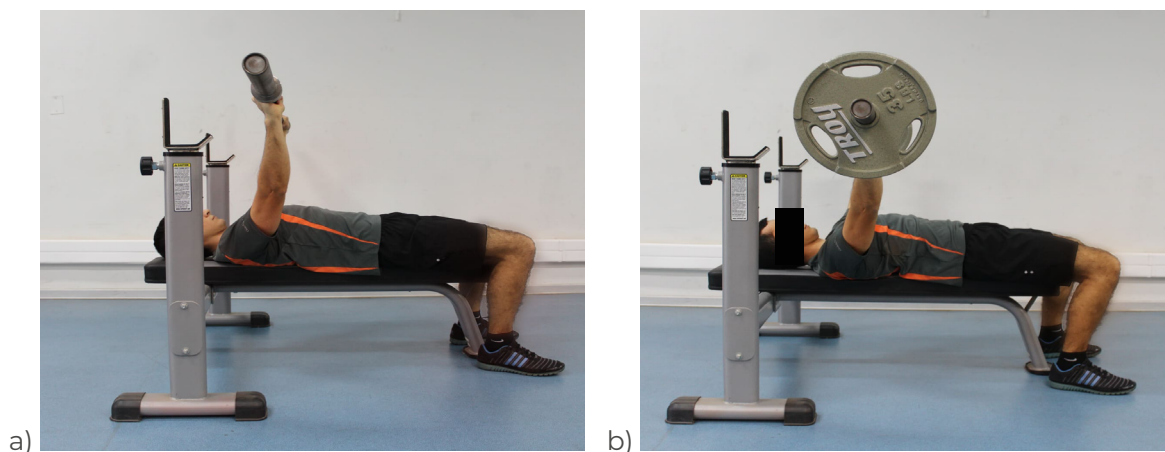


Figura 2. Ejercicio de *press de banca*: a) sin resistencia y b) con resistencia de 1 RM para el sujeto sometido a evaluación.

GUÍA DE ACTIVIDADES

Fuerza muscular dinámica

La actividad práctica contemplará la medición directa e indirecta de fuerza física del grupo muscular involucrado en el ejercicio denominado *press* de banca o prensa de pecho. Para ello se necesitará:

- Voluntarios
- Máquina de pesas (tablón de apoyo dorsal)
- Barra física móvil
- Pesos libres (para ajustar a la barra física)
- Fijadores de peso (“mariposas”)
- Cinta métrica
- Reloj o cronómetros

a) Evaluación directa de 1 RM: Protocolo de actividad

El voluntario a realizar la prueba debe permanecer en posición decúbito supino o dorsal, apoyado sobre el tablón de ejercicio con las rodillas dobladas o una pierna apoyada en el suelo y la otra pierna doblada y apoyada sobre el tablón de ejercicio.

Dos compañeros deben permanecer de pie cerca de la barra de peso libre para ayudar al voluntario en la retirada y finalización del ejercicio físico.

El voluntario debe levantar la barra de ejercicio físico sin peso adicional, como mínimo tres veces, con la finalidad de familiarizarse con el acto motor y realizar calentamiento inicial.

Se recomienda para aquellos voluntarios que nunca hayan realizado esta actividad, levantar la barra con pesos basados en el peso corporal. Para los hombres, cargar la barra con el 50% del valor del peso corporal; para mujeres, el valor del peso a levantar no debe exceder el 35% de su peso corporal. Para aquellos voluntarios que tengan experiencia en la actividad a realizar, cargar

la barra con pesos que se aproximen al 50% de 1 RM.

Completar un calentamiento inicial con ocho a diez repeticiones con el peso descrito anteriormente. El objetivo es realizar el calentamiento inicial con ocho a diez repeticiones al 40% a 60% de 1 RM. Posteriormente, el voluntario debe descansar un minuto mediante una recuperación activa.

Completar otro ciclo de calentamiento con tres a cinco repeticiones con 5 a 10 kg adicionales al primer peso, que correspondería al 60% y 80% de 1 RM, respectivamente. Luego, el voluntario debe descansar un minuto mediante una recuperación activa.

Al instante, los compañeros cargan la barra con un peso de entre 90% y 95% de 1 RM. Para ello, se adiciona a la barra previamente cargada en el segundo ciclo de calentamiento, de 5 a 10 kg más. Este peso levantado es registrado como “intento n° 1” (completar en hoja correspondiente).

Si el voluntario es capaz de completar dos a tres repeticiones con este peso (estimado entre el 90% y 95% de 1 RM), debe descansar durante dos a tres minutos.

De inmediato, los compañeros cargan la barra con de 5 a 10 kg más.

Si el voluntario es capaz de levantar satisfactoriamente este último peso (paso (i)), los compañeros deben registrarlo como “intento n° 2”. El voluntario debe descansar durante dos a tres minutos, y realizar de nuevo el paso (i), hasta que se alcance el valor de 1 RM.

Si el voluntario no es capaz de levantar satisfactoriamente este último peso (paso (i)), los compañeros deben retirar 5 a 10 kg de la barra. El voluntario debe descansar dos a tres minutos y volver a intentar levantar el peso. Si logra levantar adecuadamente el peso, el voluntario debe descansar dos a tres minutos y repetir el paso (i) hasta que se alcance el valor de 1 RM. Si el voluntario no es capaz de levantar este peso, la prueba finaliza y se considera como peso de 1 RM el valor de “intento n° 1”.

Es ideal que el voluntario haya alcanzado el valor de 1 RM dentro de cinco intentos. Si se necesitó un número mayor de intentos, es conveniente repetir la prueba en otro día debido a la fatiga muscular que puede generar, viéndose sesgada la prueba.

b) Evaluación indirecta de 1 RM: Protocolo de actividad

Es importante recordar que la predicción del peso de 1 RM se basa en la relación lineal o exponencial entre el porcentaje (%) de 1 RM y el número de repeticiones hasta la fatiga muscular (RFM).

El último paso en la predicción de 1 RM (método indirecto) es la determinación del número máximo de repeticiones hasta la fatiga muscular (RFM), considerando un peso específico a levantar. El concepto de RFM se define como el número máximo de repeticiones, sin intervalo de reposo, que el voluntario es capaz de levantar adecuadamente. Lo conveniente es que no se exceda un valor mayor a 20 como RFM, de lo contrario, si se aprecia que el voluntario puede sobrepasar ese número de repeticiones, es conveniente detener la prueba, esperar cinco minutos de reposo, y volver a realizar la medición, pero con un mayor peso a levantar.

El voluntario a realizar la prueba debe permanecer en posición decúbito supino o dorsal, apoyado sobre el tablón de ejercicio con las rodillas dobladas o una pierna apoyada en el suelo y la otra pierna doblada y apoyada sobre el tablón de ejercicio.

Dos compañeros deben permanecer de pie cerca de la barra de peso libre para ayudar al voluntario en la retirada y finalización del ejercicio físico.

El voluntario debe levantar el peso de la barra de ejercicio físico sin peso adicional, como mínimo tres veces, con la finalidad de familiarizarse con el acto motor y realizar calentamiento inicial.

Se recomienda para aquellos voluntarios que nunca hayan realizado esta actividad, levantar la barra con pesos basados en el peso corporal. Para los hombres, cargar la barra con el 50% del valor del peso corporal; para mujeres, el valor del peso a levantar no debe exceder el 35% de su peso corporal. Para aquellos voluntarios que tengan experiencia en la actividad a realizar, cargar la barra con pesos que se aproximen al 50% de 1 RM.

Completar un calentamiento inicial con ocho a diez repeticiones con el peso descrito anteriormente. El objetivo es realizar el calentamiento inicial con ocho a diez repeticiones al 40% a 60% de 1 RM. Posteriormente, el voluntario debe descansar un minuto mediante una recuperación activa.

Los voluntarios adicionan entre 5 y 10 kg al peso de la barra usada para el calentamiento inicial. Este valor de peso es registrado como “intento n° 1”.

El voluntario debe levantar este valor de peso la mayor cantidad de veces (RFM), sin intervalos de reposo o pausa. Idealmente, esta actividad debe contemplar un número de RFM entre 3 a 12. Si el voluntario logra realizar entre 3 y 12 RFM, la prueba es aceptada como válida, y el número RFM se debe dejar registrado como “intento n° 2”. Ahora bien, si el peso es levantado menos de 3 o más de 12 RFM, la prueba debe ser reiterada luego de cinco a diez minutos de descanso. Los compañeros deben adicionar (en caso de más de 12 RFM) o disminuir (en caso de menos de 3 RFM) entre 5 a 10 kg y el voluntario debe repetir la prueba hasta que se alcance la fatiga muscular dentro de las 3 a 12 RFM.

Enseguida, los compañeros deben realizar la estimación de 1 RM mediante la relación lineal o exponencial entre el % RM y el RFM, mediante las siguientes ecuaciones:

Relación lineal:

$$\% 1 \text{ RM} = 100 - (n^{\circ} \text{ RFM} * 2,5)$$

$$1 \text{ RM} = \text{peso levantado} / (\% 1 \text{ RM}/100)$$

Por ejemplo, si un sujeto realiza 10 RFM con un peso de 60 kg, se estima que 1 RM se encuentre cerca de 80 kg, ya que:

$$\% 1 \text{ RM} = 100 - (10 * 2.5)$$

$$\% 1 \text{ RM} = 75\%$$

$$\text{y} \quad 1 \text{ RM} = 60 \text{ kg} / (75/100)$$

$$1 \text{ RM} = 80 \text{ kg}$$

Relación exponencial:

$$\% 1 \text{ RM} = 52.5 + 41.9 * e^{-0.055 * n^{\circ} \text{ RFM}}$$

Por ejemplo, considerando los mismos parámetros que en la relación lineal, es decir, 10 RFM con un peso de 60 kg,

$$\% 1 \text{ RM} = 52.5 + 41.9 * e^{-0.055 * 10}$$

$$\% 1 \text{ RM} = 76,7\%$$

$$\text{y} \quad 1 \text{ RM} = 60 \text{ kg} / (76.7\% / 100)$$

$$1 \text{ RM} = 78 \text{ kg}$$

A continuación, en las tablas 1 y 2 se presentan los valores estimados de 1 RM de *press* de banca, considerando el porcentaje (%) de 1 RM y en número de RFM, tanto en el modelo de relación lineal como en el exponencial, respectivamente.

Tabla 1. Valores estimados de 1 RM, considerando el número de repeticiones hasta fatiga muscular (3 a 12 RFM) y el peso levantado en el ejercicio de *press* de banca según el modelo de relación lineal. Datos extraídos de National Strength and Conditioning Association (2000).

Repetición respecto del peso	Repetición % 1 RM	3 RM 92.5%	4 RM 90.0%	5 RM 87.5%	6 RM 85.0%	7 RM 82.5%	8 RM 80.0%	9 RM 77.5%	10 RM 75.9%	11 RM 72.5%	12 RM 70.0%
30		32	33	34	35	36	38	39	40	41	43
35		38	39	40	41	42	44	45	47	48	50
40		43	44	46	47	48	50	52	53	55	57
45		49	50	51	53	55	56	58	60	62	64
50		54	56	57	59	61	62	65	67	69	71
60		65	67	69	71	73	75	77	80	83	86
70		76	78	80	82	85	87	90	93	97	100
80		86	89	91	94	97	100	103	107	110	114
90		97	100	103	106	109	113	116	120	124	129
100		108	111	114	118	121	125	129	133	138	143
110		119	122	126	129	133	138	142	147	152	167
120		130	133	137	141	145	150	155	160	166	171
130		141	144	149	153	158	163	168	173	179	186
140		151	156	160	165	170	175	181	187	193	200
150		162	167	171	176	182	188	194	200	207	214
160		173	178	183	188	194	200	206	213	221	229
170		184	189	194	200	206	213	219	227	234	243
180		195	200	206	212	218	225	232	240	248	257
190		205	211	217	224	230	238	245	253	262	271
200		216	222	229	235	242	250	258	267	276	286
Nota: % 1 RM = 100 - (11 RM x 2.5). La tabla se puede usar para estimar 1 RM en kilogramos o libras.											

Tabla 2. Valores estimados de 1 RM, considerando el número de repeticiones hasta fatiga muscular (3 a 12 RFM) y el peso levantado en el ejercicio de *press* de banca según el modelo de relación exponencial. Datos extraídos de Mayhew, J. *et al.*⁴

Repetición respecto del peso	Repetición: % 1 RM	3 RM 88.0%	4 RM 86.1%	5 RM 84.3%	6 RM 82.6%	7 RM 81.0%	8 RM 79.5%	9 RM 78.0%	10 RM 76.7%	11 RM 75.4%	12 RM 74.2%
30		34	35	36	36	37	38	38	39	40	40
35		40	41	42	42	43	44	45	46	46	47
40		45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
45		51	52	53	54	56	57	58	59	60	61
50		57	58	59	61	62	63	64	65	66	67
60		68	70	71	73	74	75	77	78	80	81
70		80	81	83	85	86	88	90	91	93	94
80		91	93	95	97	99	101	103	104	106	108
90		102	105	107	109	111	113	115	117	119	121
100		114	116	119	121	123	126	128	130	133	135
110		125	128	130	133	136	138	141	143	146	148
120		136	139	142	145	148	151	154	156	159	162
130		148	151	154	157	160	164	167	169	172	175
140		159	163	166	169	173	176	179	183	186	189
150		170	174	178	182	185	189	192	196	199	202
160		182	186	190	194	198	201	205	209	212	216
170		193	197	202	206	210	214	218	222	225	229
180		205	209	214	218	222	226	231	235	239	243
190		216	221	225	230	235	239	244	248	252	256
200		227	232	237	242	247	252	256	261	265	270
Note: % 1 RM = $52.5 + 41.9e^{-0.055 \times n^{\circ} \text{ repeticiones}}$. La tabla se puede usar para estimar 1 RM en kilogramos o libras.											

En el año 1989, el investigador Robert Hockey reportó que el peso libre promedio levantado en el ejercicio de *press* de banca en sujetos jóvenes sanos (18 a 29 años) era de 66.2 kg para hombres y de 38.6 kg para mujeres. Los datos derivados de los percentiles de esta medición se señalan en la tabla 3.

Tabla 3. Categorización de peso libre levantado en 1 RM para la evaluación de fuerza en el ejercicio de *press* de banca según género y edad. Datos extraídos de Hockey, R.V. (1989).

HOMBRES					MUJERES			
18-29 y			30-50 y		18-29 y		30-50 y	
Categoría (percentil)	(kg)	(lb)	(kg)	(lb)	(kg)	(lb)	(kg)	(lb)
Muy por encima (>95%)	> 92.1	> 203	> 83.0	> 183	> 47.6	> 105	> 43.1	>95
Por encima (75-95%)	76.4-92.1	169-203	69.4-83.0	153-183	42.2-47.6	93-105	38.3-43.1	85-95
Promedio (25-74%)	55.6-76.3	123-168	49.4-69.3	109-152	34.9-42.1	77-92	31.5-38.2	70-84
Bajo (5-24%)	40.4-55.5	89-122	35.8-49.3	78-108	29.5-34.8	65-76	26.8-31.4	49-69
Muy bajo (< 5%)	< 40.4	< 89	< 35.8	< 79	< 29.5	< 65	< 26.8	< 59
Media	66.2	146	59.4	131	38.6	85	34.9	77

El valor de peso libre levantado en este ejercicio por las mujeres resultó ser cerca de un 60% del valor registrado en los hombres. Otro dato interesante que se puede desprender de esta ecuación es que el valor de fuerza tiende a disminuir en un 5% por década de vida entre los 30 a 50 años.

Los valores de fuerza señalados hasta ahora se expresan en términos absolutos, sin considerar el peso corporal de las personas. Suponga que usted evalúa la fuerza de 1 RM del tren superior a través del ejercicio de *press* de banca a dos sujetos sanos, hombres de similar edad. En ambos casos, usted

registra un valor de 75 kg como concepto de 1 RM. Ahora bien, ambos sujetos son de contextura física diferente, uno pesa 75 kg mientras que el otro, 85 kg, por lo tanto, es importante considerar estas diferencias personales. Por lo tanto, la medición de la fuerza va a depender del objetivo de descripción de esta, expresándola en términos del valor absoluto de 1 RM o como valor relativo, ya que para ciertas situaciones es importante considerar el peso corporal de los sujetos evaluados. Para el sujeto que pesa 75 kg, se puede aseverar que la relación entre peso levantado de 1 RM, que es de 75 kg, y el peso corporal es de 1.0 (75 kg de peso levantado de 1 RM / 75 kg de peso corporal); mientras que en el sujeto que pesa 85 kg, la relación entre el peso de 1 RM y el peso corporal es de 0.88 (75 kg de peso de 1 RM / 85 kg de peso corporal).

La tabla 4 muestra la fuerza muscular del ejercicio de *press* de banca expresada de forma relativa, según género, considerando la relación entre el valor obtenido en la evaluación de 1 RM y el peso corporal^{4,6}.

Tabla 4. Valores de la relación entre el valor de fuerza obtenido en la evaluación de 1 RM y el peso corporal. Datos extraídos de Heyward, V. H. (2000).

	HOMBRES	MUJERES
Categoría	(kg·kg ⁻¹)	(kg·kg ⁻¹)
Excelente	≥ 1.40	≥ 0.85
Buena	1.20-1.39	0.70-0.85
Promedio	1.00-1.19	0.60-0.69
Bajo	0.80-0.99	0.50-0.59
Disminuido	< 0.80	< 0.50

El valor de la fuerza muscular puede verse incrementado a través del entrenamiento físico, como lo muestra la tabla 5. En ella se señalan los valores de *press* de banca de sujetos entrenados y sedentarios, tanto en valor absoluto como relativo. Se puede apreciar que todos los sujetos entrenados evaluados evidenciaron un mayor valor de fuerza máxima (1 RM) en comparación a sujetos sedentarios.

Tabla 5. Valores absolutos y relativos de fuerza muscular máxima (1 RM) de *press* de banca en sujetos entrenados y sedentarios.

	Peso	Absoluto 1 RM	Relativo 1 RM
Grupos	(kg)	(kg)	(kg·kg ⁻¹)
Mujeres no entrenadas	61.6	28.7	0.47
Mujeres no entrenadas	66.2	38.2	0.58
Mujeres entrenadas	59.2	44.6	0.75
Hombres no entrenados	73.1	62.8	0.85
Hombres no entrenados	74.5	77.8	1.04
Hombres entrenados	86.4	115.4	1.34

GUÍA DE TRABAJO

Fuerza muscular

Evaluación directa e indirecta de 1 RM (fuerza dinámica)

Género: (M)____ Edad (años): ____ Estatura (cm):____Peso (kg):____
(F)____

a) Evaluación directa 1 RM

	T1	T2	T3	T4	T5
Press de banca (kg):	_____	_____	_____	_____	_____

b) Evaluación indirecta de 1 RM

Press de banca (kg): _____ peso levantado (kg): _____ número de repeticiones (RFM):_____

- **Estimación lineal de 1 RM:**

$$\% 1 \text{ RM} = 100 - (\# \text{ RFM} * 2.5)$$

$$\% 1 \text{ RM} = \text{_____}$$

$$\text{Valor absoluto de 1 RM} = \text{peso levantado} / (\% 1 \text{ RM} / 100)$$

$$\text{Valor absoluto de 1 RM (tabla n° 1)} = \text{_____}$$

- **Estimación curvilínea de 1 RM:**

$$\% 1 \text{ RM} = \% 1 \text{ RM} = 52.5 + 41.9 * e^{-0.055 * n^{\circ} \text{ RFM}}$$

$$\% 1 \text{ RM} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Valor absoluto de 1 RM} = \text{peso levantado} / (\% 1 \text{ RM} / 100)$$

$$\text{Valor absoluto de 1 RM (tabla n}^{\circ} 2) = \underline{\hspace{2cm}}$$

- **Comparación entre el método de relación directa e indirecta de 1 RM:**

$$1 \text{ RM (directo)} / 1 \text{ RM (indirecto)} = \underline{\hspace{2cm}}$$

c) Evaluación de fuerza muscular:

$$\text{Categoría para: Absoluto 1 RM (tabla n}^{\circ} 3) = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$\text{Relativo 1 RM (tabla n}^{\circ} 4) = \underline{\hspace{2cm}}$$

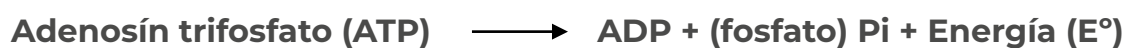
3. Fuerza muscular estática

La forma más usada para evaluar la fuerza muscular isométrica o estática es mediante el uso de la dinamometría de manos en la función de agarre, prensión o *grip*. En este tipo de contracción muscular, si bien no se modifica la longitud del grupo muscular involucrado, sí ocurre un cambio en el tejido conectivo y componente elástico de este.

3.4 Marco teórico

La importancia relativa de evaluar la fuerza muscular mediante la dinamometría de manos, específicamente la prensa o prensión de manos, es debido a la importante relación que existe entre esta y el componente de masa muscular del sujeto evaluado.

La fuerza en la prensa de manos se debe principalmente a la acción del grupo muscular flexoextensor de muñeca. Se estima que los sujetos alcanzan el pico o *peak* de fuerza de prensión de manos en un margen de 0.3 s a 2.7 s. Los hombres alcanzan el *peak* de fuerza en un tiempo menor que las mujeres, posiblemente debido a la mayor cantidad de tejido conectivo elástico que poseen y, por tanto, requieren mayor tiempo en alcanzar el punto final de elongación. En promedio, el tiempo en que los sujetos son capaces de mantener el *peak* de fuerza muscular de prensa de manos es de solo 1 s, debido principalmente a que la vía metabólica de entrega energética es la vía del fosfágeno.



En este tipo de vía metabólica, la necesidad de entregar ATP es urgente; sin embargo, las reservas de este y su principal mecanismo de fuente de producción, la fosfocreatina, a nivel muscular se encuentran muy limitadas. Como las fuentes energéticas no pueden entregarse adecuadamente mediante la vía glicolítica y oxidativa, los filamentos de actina y miosina dejan de interactuar y, por tanto, el fenómeno de contracción-relajación muscular consecuentemente decae.

GUÍA DE ACTIVIDADES

Fuerza muscular estática

La actividad práctica contempla la medición de la fuerza de prensión o prensa de manos mediante el uso de un dinamómetro (figura 3). Para ello:

- El voluntario debe permanecer en posición de pie, con la cabeza en línea media.
- La dimensión de la manilla o *grip* del dinamómetro debe quedar a una distancia tal que el ángulo ajustable del dinamómetro quede sobre la falange media del tercer dedo o dedo medio.
- El antebrazo del voluntario debe permanecer en un ángulo de 90°, respecto del brazo; mientras que este último debe permanecer en posición vertical.
- La muñeca y el antebrazo del voluntario deben quedar en una posición anatómica entre supinación y pronación.
- El voluntario deberá realizar la máxima prensión de manos una vez que los compañeros se lo indiquen. Estos últimos deben, en todo momento, incentivar al voluntario a que logre desarrollar mayor fuerza.
- El voluntario tendrá dos a tres oportunidades, con un descanso de 30 s a 1 min entre cada intento.
- Los compañeros deben registrar el mayor valor alcanzado por el voluntario, y siempre entre cada intento deberán reposicionar el marcador del dinamómetro a posición cero (0).

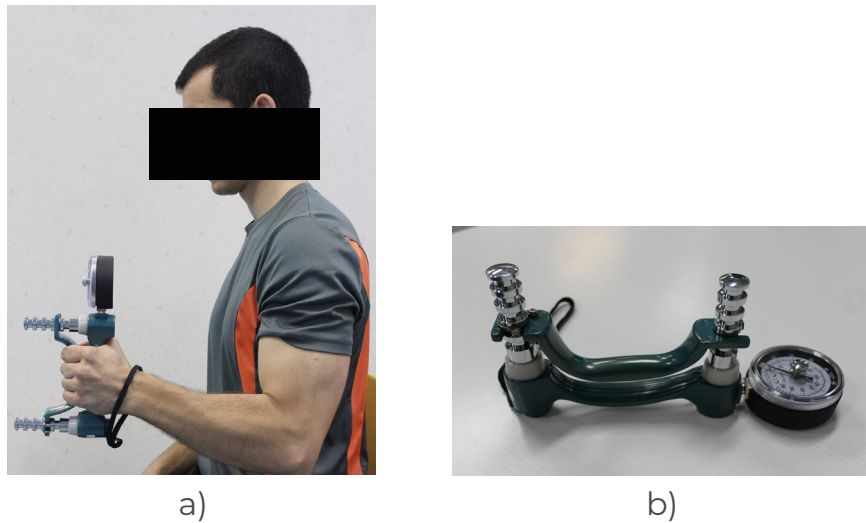


Figura 3. Ilustración de la posición del voluntario y el dinamómetro.

A continuación, en la tabla 6 se muestran los valores de fuerza de prensión de manos evaluados con el uso de dinamómetros, expresados en términos absolutos y relativos, considerando el peso corporal.

Tabla 6. Valores de prensión de manos, expresados en valor absoluto y relativo, en sujetos entre 18 a 25 años, categorizados según género. Datos extraídos de Beam, *et al.*^{7,8}.

	Hombres (n = 312)				Mujeres (n = 601)			
	Absoluto		Relativo		Absoluto		Relativo	
Categoría	(kg)	(N)	(kg·kg ⁻¹)	(N·kg ⁻¹)	(kg)	(N)	(kg·kg ⁻¹)	(N·kg ⁻¹)
Muy por encima (>95%)	> 67.7	>66.4	> 1.80	> 17.7	> 41.7	> 409	> 1.40	> 13.7
Por encima (75-95%)	57.9-67.7	568-664	1.52-1.80	14.9-17.7	35.9-41.7	352-409	1.16-1.40	11.4-13.8
Promedio (25-74%)	48.1-57.8	472-567	1.24-1.51	12.2-14.8	30.1-35.8	295-351	0.92-1.15	9.0-11.3
Bajo (5-24%)	38.3-48.0	376-471	0.96-1.23	9.4-12.1	24.3-30.0	238-294	0.68-0.91	6.7-8.9
Muy bajo (<5%)	< 38.3	< 376	< 0.96	< 9.4	< 24.3	< 238	< 0.68	< 6.7
Mean	53.0	520	1.38	13.5	33.0	324	1.04	10.2

De los datos anteriores se desprende que las mujeres presentan un valor de fuerza de prensión de manos, en valor absoluto, cercano a un 65% del valor de los hombres. Ahora bien, considerando la expresión relativa de fuerza de prensión, las mujeres poseen una relación de 1.04, lo que corresponde a un 75% del valor registrado en los hombres, el cual asciende a una relación de 1.38.

Un aspecto interesante es comparar las diferencias de estos valores dependiendo de la dominancia establecida, es decir, el lado derecho para quienes son diestros, o presentan una mayor habilidad con mano derecha, y el lado izquierdo en quienes son mas hábiles con dicha mano. Diferentes estudios han registrado que el hecho de presentar mayor fuerza con el lado dominante es un fenómeno que solo sucede en quienes son diestros, ya que presentan un valor cercano a un 6 a 8% más que su mano izquierda. Mientras que los zurdos solo presentan un 1 a 2 % más de fuerza en su mano izquierda que en su mano no hábil. Generalmente, no existe más de un 1 a 2% de diferencia entre ambas manos, y en un número elevado de sujetos, la mano derecha es más fuerte que la mano izquierda, independiente de la dominancia. Una de las teorías que explicarían esto es el hecho de que todas las cosas de uso habitual vienen, por defecto, condicionadas para la dominancia derecha y quizás, de esta manera, quienes son zurdos han tenido que desarrollar más fuerza en su lado menos hábil. En la tabla 7 se muestran los valores promedios de fuerza de prensión de manos, según género y rango etario.

Tabla 7. Valores promedio de fuerza de prensión de manos en el lado derecho o dominante, según género. Datos extraídos de Mathiowetz, R, *et al.*

	HOMBRES		MUJERES	
Grupo de edad (años)	n	promedio $\pm$ DS	n	promedio $\pm$ DS
<i>Handgrip</i> mano derecha (kg)				
6-7	26	14.7 $\pm$ 2.2	33	13.0 $\pm$ 2.0
10-11	43	24.2 $\pm$ 4.4	40	22.5 $\pm$ 3.7
14-15	34	35.1 $\pm$ 7.0	34	26.4 $\pm$ 5.6
18-19	33	49.0 $\pm$ 11.2	30	32.5 $\pm$ 5.6
<i>Handgrip</i> mano dominante (kg)				
25-29	103	53.1 $\pm$ 10.4	90	33.1 $\pm$ 6.4
30-34	61	52.2 $\pm$ 10.9	88	33.6 $\pm$ 6.8
35-39	60	53.5 $\pm$ 10.4	75	33.6 $\pm$ 7.3
40-44	55	52.2 $\pm$ 10.0	70	33.6 $\pm$ 6.8
45-49	51	54.9 $\pm$ 11.3	72	33.1 $\pm$ 7.7
50-54	52	53.5 $\pm$ 10.9	51	32.2 $\pm$ 7.3
55-59	48	43.1 $\pm$ 9.1	58	29.0 $\pm$ 6.4
60-64	49	42.6 $\pm$ 6.4	45	25.4 $\pm$ 7.3

La fuerza de prensión es similar en niños hasta la etapa de pubertad, a partir de la cual esta aumenta desproporcionadamente en los niños (figura 4).

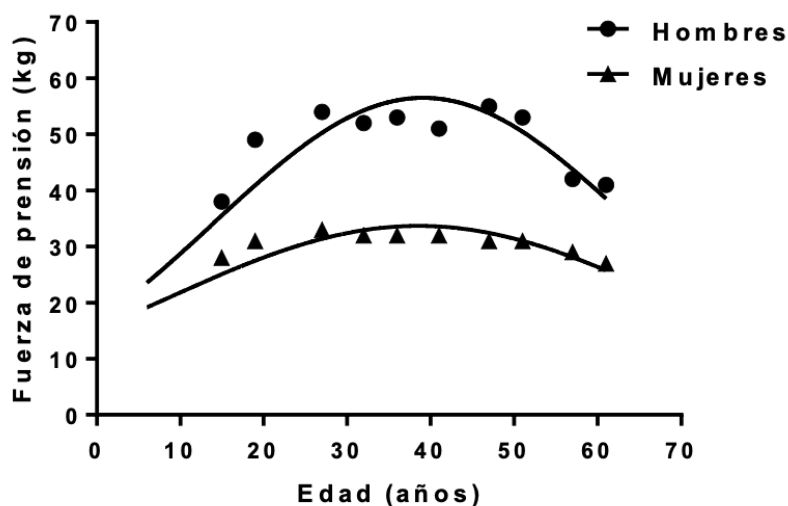


Figura 4. Relación entre fuerza de prensión y grupo etario en hombres y mujeres.

Se puede apreciar que las niñas jóvenes (6-11 años) presentan cerca de un 90% de la fuerza presentada por los hombres, y que a medida que aumenta la edad (14-19 años), este porcentaje cae a un 65 y 75%. El *peak* de fuerza de prensión aparece en la etapa temprana de la adultez (18-25 años), y que tiende a mantenerse estacionaria hasta los 50 años, tanto en hombres como en mujeres. Después de los 50 años comienza el *decline* de la fuerza de prensión de manos, siendo en los hombres con un carácter curvilíneo o exponencial.

Referencias

1. Frontera WR, Ochala J. Skeletal Muscle: A Brief Review of Structure and Function [Internet]. Vol. 45, Behavior Genetics. Springer New York LLC; 2015 [cited 2021 Mar 15]. p. 183–95. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25294644/>
2. Schoenfeld BJ, Ogborn DI, Vigotsky AD, Franchi M V., Krieger JW. Hypertrophic Effects of Concentric vs. Eccentric Muscle Actions: A Systematic Review and Meta-analysis [Internet]. Vol. 31, Journal of Strength and Conditioning Research. NSCA National Strength and Conditioning Association; 2017 [cited 2021 Mar 15]. p. 2599–608. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28486337/>
3. Vikne H, Refsnes PE, Ekmark M, Medbø JI, Gundersen V, Gundersen K. Muscular performance after concentric and eccentric exercise in trained men. *Med Sci Sports Exerc.* 2006 Oct;38(10):1770–81.
4. Mayhew JL, Prinster JL, Ware JS, Zimmer DL, Arabas JR, Bemben MG. Muscular endurance repetitions to predict bench press strength in men of different training levels. *J Sports Med Phys Fitness* [Internet]. 1995 [cited 2021 Mar 15];35(2):108–13. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7500624/>
5. Lockie R, Callaghan S, Moreno M, Risso F, Liu T, Stage A, *et al.* An Investigation of the Mechanics and Sticking Region of a One-Repetition Maximum Close-Grip Bench Press versus the Traditional Bench Press. *Sports* [Internet]. 2017 Jun 24 [cited 2021 Mar 15];5(4):46. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29910406/>
6. Burnley M, Jones AM. Power–duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *Eur J Sport Sci* [Internet]. 2018 Jan 2 [cited 2021 Mar 15];18(1):1–12. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27806677/>

7. Fredriksen PM, Mamen A, Hjelle OP, Lindberg M. Handgrip strength in 6–12-year-old children: The Health Oriented Pedagogical Project (HOPP). *Scand J Public Health* [Internet]. 2018 May 1 [cited 2021 Mar 15];46(21_suppl):54–60. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29754575/>
8. Cronin J, Lawton T, Harris N, Kilding A, McMaster DT. A brief review of handgrip strength and sport performance. *J Strength Cond Res* [Internet]. 2017 [cited 2021 Mar 15];31(11):3187–217. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28820854/>

GUÍA DE TRABAJO

Fuerza muscular

Evaluación de fuerza isométrica

Género: (M)_____ Edad (años): _____ Estatura (cm):_____

Peso (kg):_____ (F)_____

Dominancia: (Derecha) _____

(Izquierda) _____

	Intento n° 1	Intento n° 2	Intento n° 3	Valor mayor
Fuerza derecha (kg):	_____	_____	_____	_____
Fuerza izquierda (kg):	_____	_____	_____	_____
Suma de ambos valores máximos (derecha + izquierda) (kg):	_____			_____
Fuerza relativa (suma de valores máximos / peso corporal) (kg/kg ⁻¹):	_____			_____
% Diferencia ((máx. – mín.) /máx.) * 100 (%):	_____			_____
Categorización en fuerza absoluta (tabla n° 1):	_____			_____
Categorización en fuerza relativa (tabla n° 1):	_____			_____

Comentarios: _____



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

CAPÍTULO 4

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA POTENCIA ANAERÓBICA

AUTORES

Felipe A. Contreras Briceño

Eduardo Moya Gallardo

RESUMEN

El concepto de potencia, desde el enfoque de la física, es la aplicación funcional de fuerza y velocidad. Esta característica de la condición física es de gran relevancia en ciertos deportes en donde se requiere realizar un gran trabajo, pero en un tiempo muy reducido; ejemplos de deportes en los que la potencia es clave para un buen rendimiento físico son la prueba de velocidad de 100 m planos y el salto largo en atletismo, o nadar 50 m en natación, entre otros. En este capítulo se describen las pruebas o métodos más utilizados para evaluar objetivamente esta condición física a través de elementos de alta tecnología factibles de encontrar en laboratorios específicos de biomecánica o análisis del movimiento, como también con instrumental más sencillo, y por tanto, utilizables por cualquier deportólogo interesado en esta temática.

1. Introducción

En términos físicos, la potencia es el trabajo desarrollado por unidad de tiempo ($\text{Potencia} = \text{Trabajo} / \text{Tiempo}$). Dado que el trabajo es el producto de fuerza por desplazamiento ($\text{Trabajo} = \text{Fuerza} \times \text{Distancia}$) y el desplazamiento dividido por el tiempo es una velocidad ($\text{Velocidad} = \text{Distancia} / \text{Tiempo}$), en fisiología del ejercicio la potencia resulta del producto de la fuerza de contracción muscular por la velocidad del movimiento ($\text{Potencia} = \text{Fuerza} \times \text{Velocidad}$)^{1,2}. Esto supone que la misma potencia generada se puede alcanzar a través de procesos distintos; en un caso extremo, la musculatura se contrae a gran velocidad, pero con una carga baja, es decir, generando poca fuerza, como el movimiento de la batuta de un director de orquesta, mientras que, en el otro extremo, se contrae a menor velocidad, pero ejerciendo más fuerza, como cuando cargamos un pesado bulto en el maletero de un vehículo. Interesante es recordar que la velocidad (como se explicó en el capítulo 1) es una cualidad de la condición física muy “innata”, y que se modifica poco con el entrenamiento (recordar la frase “un maratonista se hace, mientras que un velocista nace”), por tanto, un aumento en la potencia se consigue a expensas casi exclusivamente de incrementos en la fuerza muscular.

$$\text{Potencia} = (\text{Fuerza} \times \text{Distancia}) / \text{Tiempo}$$

La potencia, además, puede ser medida en acciones musculares aisladas, lo que se denomina “potencia instantánea”, con una duración inferior a un segundo (décimas o centésimas de segundo). En este tipo de trabajo, la potencia máxima se puede alcanzar por una serie de factores, tales como: patrón de movimiento analizado, resistencia frente a la que se contrae el músculo (fuerza ejercida), velocidad de acortamiento de las fibras musculares, tiempo requerido para activar el proceso contráctil, eficiencia dada por el metabolismo energético, etc. También se puede medir el curso de un patrón de movimiento cíclico —como el pedaleo, la carrera a pie, el remo, entre otras—, lo que se denomina “potencia media”, en donde el tiempo integrado sería varias décimas de segundo o varios segundos. En este caso, la potencia depende —además de las variables de potencia instantánea ya mencionadas— del tiempo necesario para relajar el músculo y estirarlo nuevamente hasta la posición en la que se iniciará la nueva contracción muscular, que podría generar la acumulación de energía potencial elástica en las fases de contracción excéntrica.

En los deportes en donde la potencia es clave, la energía necesaria para contraer los músculos es proporcionada únicamente por fuentes anaeróbicas durante un tipo específico de esfuerzo máximo y corta duración, siendo más bien un ejercicio de alta intensidad que, contrariamente al ejercicio aeróbico, no requiere en forma importante del transporte y la extracción de oxígeno que proporciona el sistema cardiovascular y respiratorio.

Las actividades anaeróbicas dependen primariamente de las fuentes de energía que se encuentran dentro de la fibra muscular, tales como adenosín trifosfato (ATP) y fosfocreatina (PCr), las cuales permiten reponer rápidamente la energía del músculo. Estas actividades se abastecen de dos sistemas anaeróbicos dependiendo de la duración, intensidad y cantidad de

sustrato energético disponible: sistema de los fosfágenos, o metabolismo anaeróbico aláctico, y sistema glucolítico, o metabolismo anaeróbico láctico^{3,5}:

- **El sistema de los fosfágenos** es la fuente de ATP más rápida, y en conjunto con la fosfocreatina, son propias del músculo, por lo que no dependen del transporte de oxígeno en la sangre. Ejercicios que se realizan por un tiempo entre 5 y 15 segundos, utilizarían este metabolismo.
- **El sistema glucolítico** permite la entrega de energía a través de la glucosa sin un transporte de oxígeno eficiente, que permitirá un esfuerzo submaximal por corto tiempo. Esfuerzos por un tiempo mayor al anterior, entre 15 y 30 segundos y como máximo 60 segundos, se abastecen del sistema glucolítico anaeróbico.

2. Fundamento biomecánico

La literatura ligada a esta temática sugiere que la principal característica de un mejor rendimiento en corredores de cortas distancias es la mayor fuerza de propulsión producto de la mayor fuerza y potencia del tríceps sural^{6,7}. Así, en la fase de apoyo del acto motor, cuando actúan los extensores de cadera y rodilla, los flexores plantares de tobillo contribuyen a mejorar el rendimiento de la carrera. En este sentido, anecdóticamente la potencia anaeróbica no se mide objetivamente durante las pruebas de carrera, ya que solo se conoce el componente horizontal, el cual puede estimarse al multiplicar la masa corporal por la velocidad de la carrera⁸.

Las pruebas de carrera de velocidad no son útiles para estimar potencia anaeróbica, porque una carrera de velocidad no solo depende de la potencia muscular, sino también del componente elástico. La primera mencionada es importante durante la fase de aceleración de la carrera para mantener la velocidad máxima, mientras que la segunda, durante la fase de rebote, contribuyendo también en la velocidad máxima.

3. Fundamento fisiológico

Las pruebas de rendimiento que activan al máximo el sistema de energía de los fosfágenos (ATP-PCr) sirven como pruebas prácticas de campo para evaluar la capacidad de transferencia de energía “inmediata”. Como la duración de estas pruebas son inferior a 15 segundos, bioquímicamente son altamente dependientes de la hidrólisis de fosfágenos: ATP y PCr^{4,9}. Si la resíntesis de los fosfatos de alta energía no procede a un ritmo rápido para continuar con el ejercicio intenso y de corta duración, la energía para fosforilar el ADP, durante dicho ejercicio, provendrá principalmente de la degradación del glucógeno muscular almacenado a través de la glucólisis anaeróbica (rápida) con la formación de lactato resultante. La glucólisis rápida permite que el ATP se forme rápidamente sin oxígeno. La energía anaeróbica para la resíntesis de ATP en la glucólisis se puede ver como combustible de reserva cuando una persona acelera al comienzo del ejercicio, o durante los últimos cientos de yardas de una milla, o si realiza todo el esfuerzo de principio a fin durante una carrera de 440 m o nado de 100 m. Un claro ejemplo de ambas es Usain Bolt, récord mundial de 100 metros planos, con 9.72 s, en donde este no puede mantener la velocidad máxima durante la carrera: en los últimos segundos, el corredor comienza a disminuir la velocidad, ya que su sistema glucolítico está primando en desmedro del sistema de fosfágenos.

Si bien todos los movimientos utilizan fosfatos de alta energía en la fase inicial, algunos actos explosivos se basan casi exclusivamente en este medio de transferencia de energía. Por ejemplo, golf, fútbol, levantamiento de pesas, eventos de campo, béisbol y vóleibol requieren esfuerzos breves pero máximos durante el desempeño. Esta energía proviene casi exclusivamente de las fuentes intramusculares de fosfato de alta energía (o fosfágeno), adenosina trifosfato (ATP) y fosfocreatina (PCr).

Cada kilogramo de músculo esquelético contiene 3 a 8 mmol de ATP y cuatro a cinco veces más PCr. Por ejemplo, para una persona de 70 kg con una masa muscular de 30 kg, esto representa entre 570 y 690 mmol de fosfatos de alta energía. Suponiendo que se activan 20 kg de músculo durante el ejercicio de “grupos musculares grandes”, la energía almacenada en forma de fosfógenos es suficiente para potenciar la caminata enérgica durante 1 minuto, correr al ritmo de la maratón durante 20 a 30 segundos, o correr velozmente de 5 a 8 segundos. Para que lo anterior ocurra, va a depender además de otros factores, tales como el del sustrato energético de las fibras musculares; por consecuencia, tendrán características distintas, clasificándose en dos tipos distintos de fibra muscular:

- Fibras de contracción rápida o tipo II, que presentan una velocidad de contracción rápida y una alta capacidad para la producción anaeróbica de ATP en la glucólisis. Este tipo de fibras, a su vez, se subdividen en fibras tipo IIa, que también poseen una capacidad aeróbica relativamente alta, y en fibras tipo IIb de metabolismo, fundamentalmente anaeróbico, que se activan durante las actividades de cambio de dirección y aceleraciones, como en los deportes explosivos^{3,10}. También aumentan la producción de fuerza cuando corren o suben en una colina mientras mantienen una velocidad constante, o durante un esfuerzo total que requiere movimientos rápidos y potentes que dependen casi exclusivamente de la energía del metabolismo anaeróbico.
- El segundo tipo de fibra, la fibra muscular de contracción lenta o de tipo I, genera energía principalmente a través de vías aeróbicas. Esta fibra posee una velocidad de contracción relativamente lenta en comparación con su contraparte de contracción rápida, pero es mucho más resistente a la fatiga.

Por lo tanto, las fibras musculares tipo IIa y IIb (y su forma intermedia IIx) son predominantes durante las actividades anaeróbicas y, aunque se fatigan más rápido que las fibras tipo I, son capaces de generar más tensión y con mayor rapidez, como se requiere en este tipo de acciones.

Debido a todo lo anterior, es de gran interés para los fisiólogos del ejercicio y entrenadores cuantificar la condición anaeróbica y, de esta manera, relacionarla con el rendimiento físico y el deporte. Algunas de las pruebas más populares para medir potencia horizontal y vertical son carreras cortas cronometradas (40 yd - 800 m), salto largo y salto alto.

Este capítulo propone un énfasis a las carreras cortas cronometradas para medir condición física anaeróbica, idealmente distancia en metros, tales como 40, 50 y 60 m. Posteriormente, se analizará la potencia vertical mediante el salto alto, que permite calcular la fuerza explosiva que podría llegar a tener la persona.

4. Método para evaluación de la potencia horizontal

Tres pruebas de carrera pueden ser aplicadas simultáneamente. Para realizarlas, solo se requiere de un terreno plano, donde se encuentre marcada la distancia de la carrera, y una zona de desaceleración (figura 1).

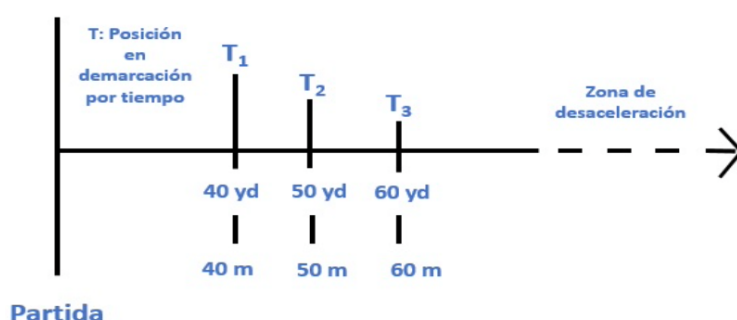


Figura 1. Ejemplo del lugar o pista donde se realizan las pruebas de carrera.

El procedimiento para administrar las pruebas de carrera, o cualquier otra prueba de tipo anaeróbico de alta intensidad, debe considerar el tiempo necesario de calentamiento y enfriamiento.

4.1 Calentamiento

Se realiza a través de la combinación de movimientos activos con elongaciones balísticas. La evidencia disponible respecto del calentamiento muestra que hay un efecto beneficioso en el rendimiento anaeróbico, esto debido a que se cree que el incremento de la temperatura corporal aumenta la distensibilidad (*compliance*) del tejido conectivo —tanto en el tendón como en el músculo y las fascias—, aumenta la velocidad de conducción nerviosa, la contribución de energía anaeróbica, y también puede crear un efecto psicológico, en el que los deportistas se sientan más preparados.

Con 15 minutos de calentamiento a una intensidad de trabajo que signifique un 60%-70% del $\dot{V}O_2$ máximo, se obtiene mejoría en el rendimiento anaeróbico en un 10%-13%; si es de mayor intensidad, produce fatiga y, por lo tanto, disminuye el rendimiento.

- **Posición inicial de la carrera**

La posición inicial debería ser con el centro de gravedad bajo, inclinación anterior de tronco, una pierna delante y otra atrás, con ambas manos apoyadas en el suelo. Los participantes deberían tener zapatos que no produzcan deslizamiento al partir.

- **Tiempo de carrera**

Con un cronómetro se marcará el tiempo para cada prueba. El inicio de la prueba será con la señal: “En su marca, listo, ¡ya!”.

- **Número de intentos**

Se realizarán dos intentos, a menos que la diferencia entre los dos sea mayor a 0.2 segundos, en cuyo caso se realizará un tercer intento.

- **Vuelta a la calma**

Se realizará durante un periodo de 5 minutos, 60%-70% $\dot{V}O_2$ máximo, en donde también se pueden realizar elongaciones estáticas.

4.2 Pasos para la carrera

- Calentamiento.
- Las tres distancias (40 m, 50 m y 60 m) están marcadas de manera visible para el participante.
- Posición de inicio, participante baja el centro de gravedad.
- El evaluador da la partida.
- Se marcan los tiempos con el cronómetro al llegar a cada una de las tres marcas.
- El corredor corre lo más rápido posible.
- El corredor repite la prueba, después del periodo de recuperación que consiste en una actividad de baja intensidad durante 3-8 minutos.
- Se realizará un tercer intento, cuando la diferencia sea mayor a 0.2 segundos.
- El corredor realiza 5 minutos de vuelta a la calma.

4.3 Cálculo de la potencia horizontal

El cálculo de esta potencia se utiliza principalmente para demostrar cómo el peso corporal y la velocidad influyen en la potencia. El aumento del peso corporal manteniendo la velocidad, y viceversa, aumentan en ambos casos la potencia. Ejemplo:

Tiempo para la carrera de 40 m: 6.3 s

Masa corporal: 700 N

Potencia horizontal: $700 \text{ N} \cdot 6.3 \text{ s} = 4\,410 \text{ Nm} \cdot \text{s}^{-1} = 4\,410 \text{ W}$

5. Discusión

Los tiempos de carrera son una medida de la capacidad para generar potencia horizontal que se produce por la utilización de fosfágenos como fuente de ATP dentro de la célula muscular. En deportes como el fútbol, el hockey en hielo, el béisbol o el baloncesto se necesita un alto grado de potencia anaeróbica para correr o saltar rápido. La baja reserva de PCr después de 5 segundos de carrera, puede ser la responsable de la incapacidad de corredores para aumentar la velocidad máxima después de cierto tiempo. Investigadores sugieren que con el entrenamiento las fibras tipo I (lentas) no se transforman en tipo IIb o IIx, pero puede ser que las fibras tipo IIa adquieran características de fibras IIb (IIx). La tabla 1 muestra valores de referencia en distintas distancias de carrera.

Tabla 1. Datos comparativos (tiempo, expresado en segundos) para las carreras de 40 m, 50 m y 60 m.

40 yd-40 m	segundos	50 yd-50 m	segundos	60 yd-60 m	segundos
Hombres		Hombres		Hombres	
40 yd – Fútbol universitario	4.74	50 yd – Récord mundial	5.15	60 yd – Récord mundial	5.99
Receptores	4.49	50 m – Récord mundial	5.56	60 m – Récord mundial	6.39
Corredores	4.55	50 m – hombres universitarios	6.8	60 yd- Criterio de béisbol	
Línea defensiva	4.89	Mujeres		Béisbol universitario	7.0
40 yd – NFL	4.81	50 yd – Récord mundial	5.74	Béisbol profesional	6.8
Mujeres		50 m – Récord mundial	5.96	Mujeres	
40 yd – Atletismo universitario	5.96	50 m – Mujeres universitarias	8.2	60 m – Récord mundial	6.92

6. Método para la evaluación de la potencia vertical a través del salto

La prueba de salto vertical proporciona una medida de la potencia mucho más precisa del tren inferior, ya que ocurre un desplazamiento de la masa corporal respecto del eje vertical y, por lo tanto, existe un trabajo mecánico de por medio. Este es una modificación del test de Sargent (1900). En la prueba original se medía la altura alcanzada respecto de la altura inicial, pero no se consideraba la masa corporal. Si se comparan dos sujetos que realizan este salto, pero uno tiene un peso mayor que otro (p. ej. 90 kg vs. 70 kg), es fácil deducir que el que tiene mayor peso debe desarrollar una potencia mayor, para levantar el peso de su cuerpo a una misma altura.

El salto vertical se ha utilizado como una prueba para medir fuerza explosiva; sin embargo, un solo salto no proporciona una medida real de la máxima capacidad de generar fuerza, ya que se necesita una mayor confiabilidad y reproducibilidad para asegurarnos de que el salto vertical máximo que se realiza refleja verdaderamente la potencia del sujeto. Sin considerar los factores biomecánicos, la capacidad de saltar depende bioquímicamente de la capacidad individual de utilizar el sistema fosfágeno rápidamente^{7, 11}.

Desde el punto de vista biomecánico, la prueba de salto combina extensión de cadera (glúteos e isquiotibiales) y rodilla (vastos y recto femoral), con flexión plantar de tobillo (gastrocnemios y sóleo). El tipo de salto vertical mediante estas sinergias musculares determinará la distancia vertical máxima que podría lograr el sujeto. En estudios se ha visto de manera aislada el cuádriceps durante un salto, evidenciando que, aunque el porcentaje de fibras musculares rápidas del vasto medial es significativo, puede no ser suficiente la relevancia fisiológica de esta.

La potencia generada durante el salto (W) depende del componente fuerza, que se conforma con la masa corporal (N) y el desplazamiento vertical (m) durante el salto, y el tiempo en el aire; la medida de estos tres componentes será $Nm \cdot s^{-1}$.

El movimiento de salto ha sido comparado con el arranque y envión en halterofilia, es decir, el gesto motor de estos podría evaluarse objetivamente en el movimiento del salto para así, mediante un protocolo de entrenamiento, estimar en los sujetos si hay un cambio que podría beneficiarlos en el deporte específico que realizan.

a) Comparando dos tipos de salto: salto estático (SJ) y salto contra movimiento (CMJ).

El CMJ es la forma natural de saltar, donde para salir de la posición inicial se hace un contramovimiento hacia la posición de partida; en cambio, en el SJ se salta partiendo de esta última posición. Algunos autores mencionan las ventajas de CMJ:

- Es la forma habitual de saltar.
- Participa la fuerza de retracción de los tejidos elásticos.
- Mayor reclutamiento de fibras musculares, debido al reflejo miotático.
- Alteración de las propiedades contráctiles del músculo.
- Mayor tiempo para desarrollar la fuerza.

b) Equipamiento

La medición del salto vertical y potencia de piernas puede ser registrada usando diferentes métodos: directo, calculando la diferencia entre el punto de inicio y la máxima distancia alcanzada durante el salto, o también mediante dispositivos electrónicos que miden el tiempo y la fuerza involucrada en el salto.

Para medir directamente la altura del salto vertical, se recomienda el dispositivo comercialmente disponible Vertec™ (figura 2)^{7,12}.



Figura 2. Vertec™ es un kit comercial que sirve para medir la altura alcanzada en el salto vertical.

Si no se cuenta con este dispositivo, se puede realizar una escala en la pared para medir la altura del salto (figura 3), marcando con tiza o agua en los dedos del saltador para hacer visible en el punto más alto logrado.

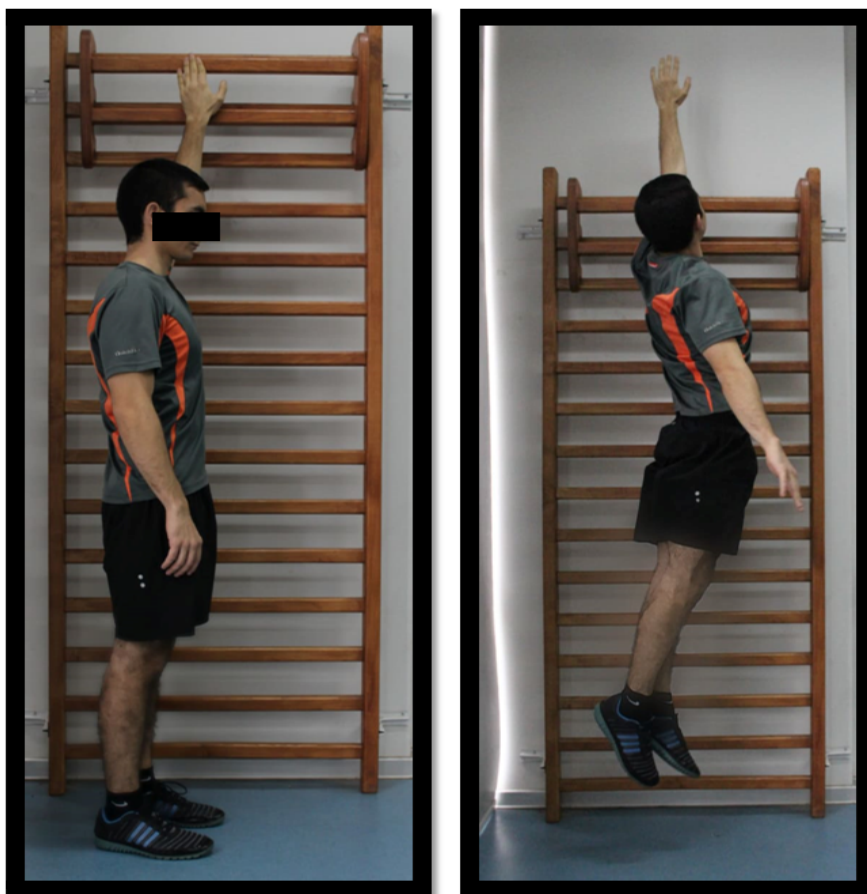


Figura 3. Posición inicial y posición de salto para la evaluación.

c) Procedimiento

Se recomienda hacer un calentamiento previo y estandarizar la posición inicial y durante la prueba:

- **Calentamiento:** 5-10 minutos, incluyendo pequeños saltos verticales, elongaciones que incluyan movilidad de hombro, que debe tener rango de movilidad completo.
- **Posición inicial y mediciones:** la distancia se calcula en dos mediciones de salto vertical, que puede ser hecha en mediciones de 0.5 o 1 cm.

- **Posición inicial de pie:** el saltador debe estar en posición bípeda, con los pies juntos y el brazo dominante cerca de la pared, en una posición estándar con apoyo de la palma en la pared o dispositivo utilizado. El punto de inicio (altura de alcance permanente) representa la distancia desde la marca de la pared (dedo medio) hasta el piso, registrada en centímetros (cm).
- **Posición de salto:** los pies no pueden cambiar de posición antes del salto, se deben flexionar las rodillas a un ángulo de aproximadamente 90° mientras mueve los brazos hacia una extensión en una posición alada. Empuje hacia adelante y hacia arriba, tocando lo más alto posible en la pared mientras se aterriza con flexión de rodillas para absorber el impacto.

Como mínimo, realice tres intentos de la prueba de salto, utilizando la distancia alcanzada más alta como la altura vertical. Sin embargo, el promedio de los últimos tres intentos de diez proporciona una altura de salto más confiable. La altura del salto vertical (cm) se mide con la diferencia entre la altura del alcance de pie y la altura vertical alcanzada en el salto.

d) Cálculo de la potencia para el salto vertical

- **Distancia de salto:** primero se calcula la distancia del salto vertical, restando la altura de la posición inicial con la altura del mejor intento de salto.

- **Potencia media:** la potencia media puede ser determinada conociendo el trabajo en un periodo de tiempo. La ecuación 1, también referida como la Ecuación de Lewis, calcula la potencia considerando la fase de ascenso del vuelo no desde el empuje. En la actualidad, el tiempo de vuelo no es medido, sino derivado de la constante de la caída de los cuerpos.

Ecuación 1:

$$\text{Potencia media (W)} = 2.21 \cdot \text{masa corporal (N)} \cdot [\text{diferencia vertical (m)}]^{1/2}$$

Donde: $2.21 = (4.9)^{1/2}$ (constante basada en la caída de los cuerpos)

Por ejemplo, si una persona tiene un peso corporal de 657 N (67 kg) y la diferencia de la altura en el salto es de 0.51 m, tendremos:

$$\text{Potencia media (W)} = 2.21 \cdot 657 \text{ N} \cdot 0.51^{1/2} \text{ (m)} = 1\,037 \text{ W}$$

La potencia absoluta se refiere a aquella expresada solo en vatios (watts), mientras que la potencia relativa es aquella que se expresa en relación con el peso corporal. En la ecuación 2 hay una relación lineal directa entre potencia *peak* expresada en watts por kilogramo y distancia vertical del centro de gravedad durante el salto en la plataforma de fuerza.

Ecuación 2:

$$\text{Potencia media relativa (W} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{Potencia (W)} / \text{peso corporal (kg)}$$

Para una potencia absoluta de 1 037 W, peso corporal: 67 kg

$$\text{Potencia media relativa (W} \cdot \text{kg}^{-1}) = 1\,037 \text{ W} / 67 \text{ kg} = 15.5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- **Potencia *peak*:** la fórmula de potencia media ha sido criticada, porque no refleja la potencia *peak* generada durante el salto. Recientes estudios analizaron los datos obtenidos en mediciones en una plataforma de fuerza durante el salto y arrojaron ecuaciones que pueden ser utilizadas para calcular la potencia *peak*.

Un método para estimar la potencia pico (*peak power*) es la Ecuación de Sayers (ecuación 3), en la cual se utiliza el promedio de altura de salto tras realizar al menos tres mediciones de la mayor altura alcanzada.

Ecuación 3:

$$\text{Potencia peak (W)} = (51.9 \cdot \text{altura CMJ (cm)}) + (48.9 \cdot \text{masa corporal (kg)}) - 2\,007$$

Para el ejemplo anterior:

$$\text{Potencia peak: } (51.9 \cdot 51 \text{ cm}) + (48.9 \cdot 67 \text{ kg}) - 2\,007 = 3\,916 \text{ W (absoluta).}$$

Para calcular la potencia relativa, se divide por el peso corporal:

$$3\,916 \text{ W} / 67 \text{ kg} = 58.4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tabla 2. Normas para el salto vertical (*vertical jump*) y potencia media derivada de la ecuación de Lewis y la potencia *peak* derivada de la Ecuación de Sayers.

Categoría (percentil)	Salto vertical (cm)		Potencia promedio (W)- Lewis		Potencia pico (W)- Sayers	
	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres	Hombres	Mujeres
Muy por encima (> 95th)	> 71.1	> 48.3	> 1 446	> 954	> 5 554	> 3 596
Por encima (75yh-95th)	62.2-71.1	39.4-48.3	1 353-1 446	861-954	5 092-5 554	3 134-3 596
Promedio (25yh-74th)	50.8-62.1	31.8-39.3	1 223-1 352	774-860	4 500-5 091	2 740-3 133
Bajo (5th-24th)	41.9-50.7	25.4-31.7	1 110-1 222	692-773	4 038-4 499	2 408-2 739
Muy bajo (< 5th)	< 41.9	< 25.4	< 1 110	< 692	< 4 038	< 2 408

Referencias

1. Burnley M, Jones AM. Power–duration relationship: Physiology, fatigue, and the limits of human performance. *Eur J Sport Sci* [Internet]. 2018 Jan 2 [cited 2021 Mar 14];18(1):1–12. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27806677/>
2. Jones AM, Vanhatalo A. The ‘Critical Power’ Concept: Applications to Sports Performance with a Focus on Intermittent High-Intensity Exercise. Vol. 47, *Sports Medicine*. Springer International Publishing; 2017. p. 65–78.
3. Frontera WR, Ochala J. Skeletal Muscle: A Brief Review of Structure and Function [Internet]. Vol. 45, *Behavior Genetics*. Springer New York LLC; 2015 [cited 2021 Mar 14]. p. 183–95. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25294644/>
4. Areta JL, Hopkins WG. Skeletal Muscle Glycogen Content at Rest and During Endurance Exercise in Humans: A Meta-Analysis. Vol. 48, *Sports Medicine*. Springer International Publishing; 2018. p. 2091–102.
5. Campos GER, Luecke TJ, Wendeln HK, Toma K, Hagerman FC, Murray TF, *et al.* Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: Specificity of repetition maximum training zones. *Eur J Appl Physiol*. 2002;88(1–2):50–60.
6. Wilson JM, Loenneke JP, Jo E, Wilson GJ, Zourdos MC, Kim JS. The effects of endurance, strength, and power training on muscle fiber type shifting [Internet]. Vol. 26, *Journal of Strength and Conditioning Research*. J Strength Cond Res; 2012 [cited 2021 Mar 14]. p. 1724–9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21912291/>

7. Watkins CM, Barillas SR, Wong MA, Archer DC, Dobbs IJ, Lockie RG, *et al*. Determination of vertical jump as a measure of neuromuscular readiness and fatigue. *J Strength Cond Res* [Internet]. 2017 [cited 2021 Mar 14];31(12):3305–10. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28902119/>
8. Trappe S, Luden N, Minchev K, Raue U, Jemiolo B, Trappe TA. Skeletal muscle signature of a champion sprint runner. *J Appl Physiol*. 2015 Jun 15;118(12):1460–6.
9. Pasiakos SM, Margolis LM, Orr JS. Optimized dietary strategies to protect skeletal muscle mass during periods of unavoidable energy deficit. Vol. 29, *FASEB Journal*. FASEB; 2015. p. 1136–42.
10. Hernández ÁG. Muscle, metabolic paradigm in nutritional recovery. *Nutr Hosp*. 2019 May 1;36(Ext2):4–11.
11. Malisoux L, Francaux M, Nielens H, Theisen D. Stretch-shortening cycle exercises: An effective training paradigm to enhance power output of human single muscle fibers. *J Appl Physiol*. 2006 Mar;100(3):771–9.
12. Yingling VR, Castro DA, Duong JT, Malpartida FJ, Usher JR, OJ. The reliability of vertical jump tests between the Vertec and My Jump phone application. *PeerJ* [Internet]. 2018 [cited 2021 Mar 14];6(4):e4669. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29692955>
13. Sayers SP, Harackiewicz DV, Harman EH, Frykman PN, Rosenstein MT. Cross-validation of three jump power equations. *Med Sci Sports Exerc*. 1999 Apr;31(4):572–577.

GUÍA DE ACTIVIDADES

- **Objetivo:**

Calcular el valor de potencia anaeróbica mediante la prueba de salto vertical.

- **Instrucciones:**

De acuerdo con las instrucciones del capítulo, realice la prueba de salto vertical y registre los valores correspondientes a la potencia anaeróbica absoluta, media y *peak*. Posteriormente, categorice su valor.

Nombre: _____

Género: ____ Edad: ____ Peso: ____ (kg) Masa corporal (N): ____

Medición inicial: ____ (m)

- **Medición salto:**

1 ____ 2 ____ 3 ____ 4 ____ Mejor intento: ____ (m)

Potencia media absoluta: ____ (W)

Potencia media relativa: ____ (W)

Potencia *peak* absoluta: ____ (W)

Potencia *peak* relativa: ____ (W)

- **Categoría:**

Salto vertical ____ Potencia media: ____ (W) Potencia *peak*: ____ (W)



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

CAPÍTULO 5

CONDICIONANTES DE LAS RESPUESTAS HEMODINÁMICAS DURANTE EL EJERCICIO FÍSICO

AUTOR

Felipe A. Contreras Briceño

RESUMEN

Durante el ejercicio físico, el sistema cardiovascular responde con cambios tanto a nivel central (bomba cardiaca) como a nivel periférico (vasos sanguíneos), con la finalidad de aumentar el gasto cardiaco y disminuir la resistencia vascular periférica, y así satisfacer las demandas metabólicas a través de un flujo sanguíneo adecuado a las necesidades de entrega de nutrientes y oxígeno para el correcto funcionamiento del sistema músculo-esquelético. Ahora bien, la magnitud de los cambios en las principales variables cardiovasculares dependerá del tipo, duración e intensidad del ejercicio físico. Este capítulo describe las respuestas agudas hemodinámicas que ocurren cuando se realiza ejercicios de resistencia aeróbica (*endurance*) y de sobrecarga, o de fuerza (*resistance*), con el objetivo de valorar los cambios en la presión arterial como método de identificar respuestas fisiológicas o patológicas durante la práctica deportiva.

1. Introducción

El concepto de presión arterial es definido como la fuerza que ejerce la sangre (flujo sanguíneo) sobre la superficie de las paredes arteriales durante un ciclo cardíaco. La respuesta de la presión arterial durante el ejercicio varía respecto del modo o tipo de ejercicio que se realice¹⁻³. Es de vital importancia, durante el desarrollo de un ejercicio físico, la consideración de las variables hemodinámicas de presión arterial, tanto sistólica como diastólica, y de frecuencia cardíaca, ya que su correcta interpretación otorga información relevante respecto del trabajo cardíaco y consumo de oxígeno de los cardiomiocitos, al integrar ambas en el concepto denominado doble producto (frecuencia cardíaca x presión arterial sistólica). El registro de la presión arterial sistólica durante un ejercicio progresivo entrega información útil para diagnosticar enfermedades cardíacas y puede revelar problemas en sujetos que muestran un aumento exagerado de esta durante el ejercicio, a pesar de tener valores normotensivos en condiciones de reposo. Contrariamente, una disminución de esta presión (considerablemente, bajo 20 mm Hg), a pesar de un aumento en la intensidad de ejercicio, es de relevancia clínica significativa si se acompaña de isquemia cardíaca o dolor torácico^{4,5}. Por otro lado, la determinación de la presión de pulso o presión diferencial (presión arterial sistólica – presión arterial diastólica) entrega las bases para el cálculo de la presión arterial media (PAM) durante el ejercicio, ya que a diferencia de lo que ocurre en condiciones estacionarias de reposo, durante la actividad física la reducida duración de cada ciclo cardíaco (especialmente, la diástole) hace que los periodos de sístole y diástole dejen de mantener la relación temporal que tienen en condiciones de reposo. La contribución activa del llenado ventricular (contracción auricular) es más relevante de lo que ocurre en reposo. Por tal motivo, el concepto de presión arterial media no es el más adecuado para interpretar la respuesta macro-hemodinámica de

sujetos sometidos a estrés físico. Sumado a esto, últimamente, el registro de la presión arterial durante el periodo de recuperación posejercicio ha cobrado mayor relevancia, ya que se relaciona con el riesgo de aparición de síncope, específicamente en aquellos sujetos que realizan actividad física esporádicamente o son inactivos físicamente^{2, 4, 6, 7}.

2. Marco teórico

Numerosos son los factores que pueden afectar la presión arterial durante el desarrollo de un ejercicio. Algunos involucran factores propios de los sujetos, como edad, masa muscular, nivel de condición física, factores mórbidos, etc., y otros involucran específicamente al tipo de ejercicio, sea este isométrico y/o estático y anisométrico y/o dinámico^{1,8}.

El término presión, en física, se define como el cociente entre fuerza y superficie en que esta se ejerce. En el sistema circulatorio, por similitud con un circuito hidráulico o eléctrico, también se puede representar la presión como el producto entre flujo y resistencia (Ley de Ohm: Flujo = diferencia de presión / diferencia de resistencia). De lo anterior, se deduce entonces que la presión arterial es función de flujo sanguíneo o gasto cardiaco (GC) (Ley de Starling: Volumen de llenado ventricular = Volumen expulsivo) y de la resistencia periférica total (RPT) o resistencia vascular periférica (RVP).

A continuación, se presenta la Ley de Ohm aplicada al sistema cardiovascular para la determinación de la presión arterial.

Ley de Ohm: Flujo = Δ Presión / Δ Resistencia

Desglosando cada una de las variables, se tiene que:

- Respecto del flujo sanguíneo:

Flujo = Gasto cardiaco (GC) que, en promedio, es igual al retorno venoso, y el gasto cardiaco, a su vez, depende de:

$GC = \text{Frecuencia cardiaca (FC)} \times \text{Volumen sistólico (Vol. sist.)}$

- Respecto de la diferencia de presión:

$\Delta \text{ Presión} = \text{Presión ventrículo izquierdo} - \text{Presión aurícula derecha.}$

$\Delta \text{ Presión} = \text{PAM} - \text{Presión aurícula derecha.}$

El valor de presión en la aurícula derecha, o presión venosa central (PVC), es despreciable, por tanto, se acepta el valor 0.

- Y, por último, respecto de la diferencia de resistencia:

$\Delta \text{ Resistencia} = \text{Resistencia Vascular Periférica (RVP).}$

Es importante recordar que los principales vasos sanguíneos encargados de regular la resistencia periférica son las arteriolas a través de respuestas vasomotoras (vasoconstricción o vasodilatación). Esto se consigue modulando el estado de contracción o relajación de la musculatura lisa de la pared; en parte, regulado por el sistema nervioso autónomo y, en parte, por factores autorreguladores metabólicos y endoteliales.

Por tanto, considerando la Ley de Ohm y despejando las variables, se tiene que:

$$\text{PAM} = \text{FC} \times \text{Vol. sist.} \times \text{RVP} - \text{PVC (aurícula derecha)}$$

Un ejemplo para entender lo anterior es el siguiente. Si se asume que el flujo sanguíneo (gasto cardíaco), en condiciones de reposo, durante el periodo de sístole ventricular es de $6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ y durante la diástole ventricular es de $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, y que la resistencia vascular periférica (RVP) es de $20 \text{ mm Hg} \cdot \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, entonces:

- Presión arterial sistólica (PAS) = $6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot 20 \text{ mm Hg} \cdot \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; 120 mm Hg.
- Presión arterial diastólica (PAD) = $4 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1} \cdot 20 \text{ mm Hg} \cdot \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; 80 mm Hg.

Como se mencionó anteriormente, los valores de PAS y PAD son el resultado de los cambios en el flujo sanguíneo (bombeo cardíaco) y en la resistencia periférica. A medida que aumenta la demanda metabólica por parte de un ejercicio, el gasto cardíaco se incrementa significativamente gracias al aumento de la frecuencia cardíaca y del volumen sistólico (Vol. sist.), que se traduce por la fórmula mencionada anteriormente en un mayor flujo sanguíneo al sistema arterial. Gran parte de este mayor caudal de sangre (y, por tanto, presión en la salida del corazón) es “absorbida” por la elasticidad de las paredes arteriales de la aorta y las grandes arterias. La gran distensibilidad (cambios de volumen sanguíneo, por cambios de presión sanguínea) y elasticidad (retención de presión arterial en fase de diástole) de los vasos sanguíneos arteriales de gran calibre (p. ej.: aorta, carótida común,

pulmonar y sus ramas) amortiguan cambios en el flujo sanguíneo, que es pulsátil, pero no se detiene cuando el corazón se está llenando, y también en la presión arterial que oscila pero no llega a caer a cero, fenómeno conocido como “efecto Windkessel”⁹⁻¹².

Así pues, el efecto Windkessel ayuda amortiguando la fluctuación de la presión arterial durante el ciclo cardiaco y en el mantenimiento de la perfusión de órganos durante el periodo de diástole, cuando la eyección cardiaca cesa (figura 1).

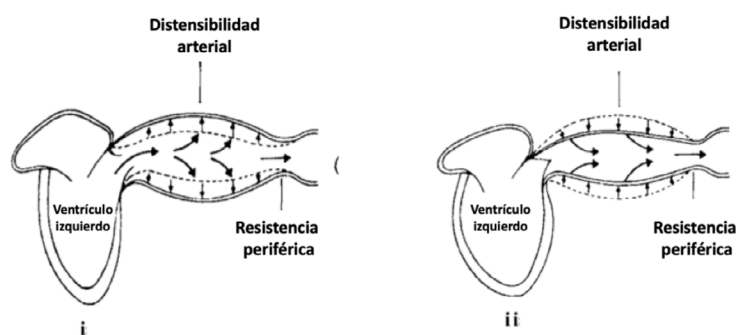


Figura 1. Esquematización del efecto Windkessel, en el periodo de sístole (i) y diástole ventricular (ii). Durante el periodo de sístole, las grandes arterias, como la aorta, en condiciones normales presentan una adecuada distensibilidad, otorgando cierta amortiguación al gran flujo sanguíneo proveniente del ventrículo izquierdo tras el periodo de expulsión o eyección miocárdica. El flujo sanguíneo almacenado durante la sístole permite mantener una adecuada perfusión hacia los tejidos en el periodo de diástole ventricular.

3. Ejercicio físico

Durante el ejercicio físico, el flujo sanguíneo se redistribuye en función de la intensidad y del tamaño de la masa muscular implicada, que condicionan el grado de estimulación simpático-adrenal alcanzado. A su vez, el gasto cardiaco aumenta, de forma que algunos órganos pueden recibir la misma cantidad relativa de sangre con respecto al gasto cardiaco, aunque aumentando la cantidad absoluta en proporción directa al gasto cardiaco; es decir, un órgano puede recibir 12% en reposo y en ejercicio, pero ese 12% será diferente entre $6 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ de GC al reposo que a $15 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ en ejercicio. De la misma manera, algunos órganos, como los del sistema nervioso central, reciben una menor cantidad relativa de sangre a medida que aumenta el gasto cardiaco, a pesar de que la cantidad absoluta queda preservada (el cerebro recibe, aproximadamente, la misma cantidad absoluta de sangre en condiciones de ejercicio y de reposo)^{1, 4, 8, 13}.

Los riñones y las vísceras del área esplácnica experimentan una importante reducción de la cantidad de sangre que reciben, pudiendo llegar a disminuir su flujo sanguíneo unas cuatro a cinco veces en comparación a condiciones de reposo. El flujo de sangre en estas zonas disminuye en proporción a la intensidad relativa del ejercicio realizado, observándose reducciones significativas durante cargas relativamente bajas de ejercicio.

Dos factores contribuyen a la reducción del flujo sanguíneo en los tejidos no activos:

- 1) la activación simpático-adrenal, y
- 2) las sustancias locales que estimulan la vasoconstricción o potencian los efectos de los factores vasoconstrictores.

La presión arterial sistólica y diastólica presentan diferentes respuestas durante el ejercicio, variando en función del tipo de contracciones realizadas (ejercicios de resistencia o dinámicos y ejercicios de fuerza o estáticos). De manera general, se puede afirmar que tanto en los ejercicios físicos dinámicos, que involucran a un gran grupo de fibras musculares (p. ej.: ciclismo, natación, trote, etc.), como en los estáticos (p. ej.: mesa de cuádriceps, prensa o *press* de piernas, etc.) ocurre un aumento de la tensión arterial sistólica, ya que esta depende del gasto cardíaco. Sin embargo, la presión arterial diastólica, que es determinada principalmente por la resistencia periférica vascular, puede mantenerse estacionaria o incluso disminuir en los ejercicios de resistencia física y aumentar en los ejercicios estáticos.

4. Respuesta a los ejercicios dinámicos (endurance)

Aquellos ejercicios físicos que involucren la utilización de una gran masa muscular traerá como consecuencia el aumento de la presión arterial sistólica en proporción directa a la intensidad del ejercicio^{1, 7, 8}. Desde las cifras de reposo (120 mm Hg), se pueden alcanzar hasta 200 mm Hg, o más, durante el ejercicio. El aumento de la presión arterial sistólica es debido al aumento del gasto cardiaco, el cual es producto del volumen sistólico y de la frecuencia cardiaca, es decir, del inotropismo, precarga, poscarga y del cronotropismo cardiaco, respectivamente.

La presión arterial diastólica cambia poco con este tipo de ejercicios, independiente de la intensidad. Los cambios de esta presión se atribuyen al grado de vasodilatación local que experimentan los vasos sanguíneos cercanos a los músculos participantes. Si esta presión aumenta con el ejercicio dinámico, se considera una respuesta no fisiológica, constituyendo, además, una de las indicaciones absolutas (aumento mayor a 115 mm Hg) para detener una prueba de esfuerzo.

En cualquier caso, lo que sí se observa es un aumento progresivo de la presión diferencial o de pulso (presión sistólica – presión diastólica), ya que en cualquier caso, la presión sistólica aumenta más que la presión diastólica¹³.

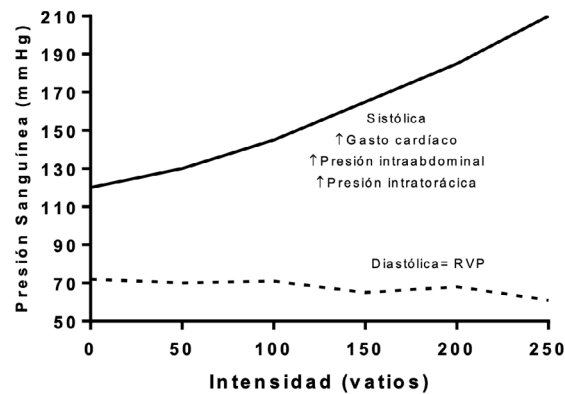


Figura 2. Respuesta característica de la presión arterial durante la realización de un ejercicio incremental. RVP: resistencia vascular periférica.

La tabla 1 y la figura 3 ejemplifican los valores de las variables hemodinámicas de flujo sanguíneo, resistencia periférica total o vascular periférica (RVP) y presión arterial sistólica y diastólica, a medida que se desarrolla un ejercicio de carga incremental de trabajo.

Tabla 1. Respuesta de las variables de flujo sanguíneo, resistencia vascular periférica (RVP) y presión arterial frente a un ejercicio incremental en sujetos sanos y en sujetos con elevada resistencia periférica total.

Estado	Flujo sanguíneo		RVP		Normal		RVP elevada	
	Sistólica	Diastólica	Normal	Elevada	SBP	DBP	SBP	DBP
Reposo	6.0	4.0	20.0	25.0	120	80	150	100
50 W	15.0	8.0	10.0	12.5	150	80	188	100
100 W	24.0	11.5	7.0	8.8	168	81	210	101
150 W	33.0	14.5	5.5	6.9	182	80	227	100
200 W	42.0	18.0	4.5	5.6	189	81	236	101
Recuperación	15.0	9.0	9.0	11.3	135	81	169	101

Nota: Para fines ilustrativos, los valores son estimados e “idealizados”. Los sujetos con RVP elevada tienen el mismo gasto cardíaco y flujo sanguíneo que los “normales”, pero con 25% más alto de RVP causado por arterioesclerosis avanzada.

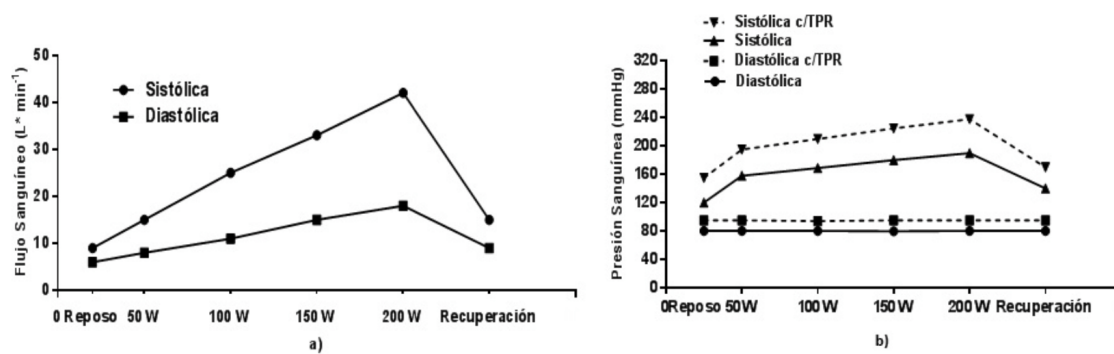


Figura 3. Respuesta en (a) gasto cardíaco o flujo sanguíneo, y en (b) presión arterial sistólica y diastólica en sujetos normales y en personas con elevada resistencia vascular periférica (c/TPR).

De los gráficos anteriores, se puede apreciar que en sujetos sanos ocurre un aumento de la presión sistólica, mientras que la presión diastólica permanece estacionaria. A medida que aumenta la carga de trabajo, hay un incremento significativo del flujo sanguíneo que entra al sistema arterial. Gran parte de ese aumento de flujo sanguíneo ocurre durante el periodo de sístole cardíaca (ventricular). Sin embargo, durante el periodo de diástole cardíaca ocurre un pequeño aumento en el flujo sanguíneo como resultado de la distensibilidad de las paredes arteriales de los grandes vasos. El aumento en el flujo sanguíneo sistólico crea un aumento en la presión arterial sistólica, a pesar de existir una disminución de la resistencia vascular periférica de las grandes arterias. La caída en la resistencia vascular periférica reduce o limita un mayor aumento de la presión arterial sistólica durante el ejercicio. Teóricamente, si la RVP permaneciera estacionaria en el valor unitario de 20 (evento que no sucede realmente) y el flujo sanguíneo pudiera aumentar de $6 L \cdot min^{-1}$ a $42 L \cdot min^{-1}$ durante el periodo de sístole (evento que no sucede si no existe una disminución de la RVP), la PAS podría alcanzar un valor de 840 mm Hg, lo que ocasionaría el desgarramiento de una gran cantidad de vasos sanguíneos.

$$RVP = PAS / \text{Flujo sanguíneo}$$

El aumento del flujo sanguíneo durante la diástole (debido al “efecto Windkessel”) es mucho menor que durante el periodo de sístole. De hecho, el aumento en el flujo sanguíneo diastólico es casi igual a la disminución de la RVP. Ambos eventos fundamentan el porqué en sujetos sanos con resistencia vascular normal el valor de la PAD se mantiene estacionario en este tipo de ejercicio físico.

La arterioesclerosis es una patología que engrosa lentamente las paredes arteriales, y al aumentar la rigidez de las paredes y disminuir el lumen de los vasos sanguíneos, tiene como consecuencia un considerable aumento de la RVP. Por lo tanto, sujetos con elevadas RVP debido a enfermedades cardiovasculares, asumiendo que presentan el mismo valor de flujo sanguíneo que sujetos sanos, pueden presentar valores elevados de PAS y PAD.

Otra información relevante que se desprende del registro de PAS es al relacionarla con la frecuencia cardíaca, para así obtener la variable hemodinámica denominada doble producto (DP) o producto frecuencia-presión. El trabajo realizado o requerido por el corazón durante un ejercicio depende tanto de la frecuencia cardíaca como de la resistencia contra la cual se eyecta la sangre bombeada, es decir, la presión sanguínea en el árbol arterial (PAS). Por tanto, el concepto de doble producto refleja el trabajo mecánico del corazón y posee una estrecha relación con el valor de consumo de oxígeno miocárdico.

El valor de presión arterial media (PAM) es determinado por $(PAS + 2 PAD) / 3$, o bien $(PAD + (PAS - PAD) / 3)$; debido al tiempo de duración del periodo de sístole y diástole ventricular, en condiciones de reposo, y considerando un valor de FC de 75 lpm, con un ciclo cardiaco de 800 ms de duración, $(60 \text{ s} / 75 \text{ lpm})$, el periodo de sístole ventricular duraría 500 ms y el de diástole, 300 ms. Sin embargo, en condiciones de ejercicio es complejo estimar el valor de PAM, debido a la mayor frecuencia cardíaca y las variaciones en la duración de estos periodos cardiacos. Por esta razón, varios investigadores recomiendan que el cálculo de la PAM debe evitarse o debe calcularse de otra manera en condiciones de ejercicio.

5.Respuesta a los ejercicios estáticos o de fuerza

Durante las contracciones musculares, especialmente las concéntricas e isométricas, los músculos comprimen mecánicamente las arterias periféricas que irrigan los músculos activos, aumentando así la resistencia al paso de sangre y, en consecuencia, el flujo sanguíneo se reduce proporcionalmente al porcentaje de fuerza máxima ejercida. Para contrarrestar esta reducción del flujo sanguíneo, el gasto cardiaco, la actividad simpática y la presión arterial media aumentan. Durante las fases estáticas, se produce un aumento de la presión arterial diastólica, además la activación simpática por acción de las catecolaminas provoca también un aumento de la presión arterial sistólica. La magnitud de la respuesta de la presión arterial depende de la fuerza generada y de la cantidad de masa muscular activada, habiéndose descrito valores de presión arterial diastólica mayores a 400 mm Hg^{1, 4, 5, 7, 8}.

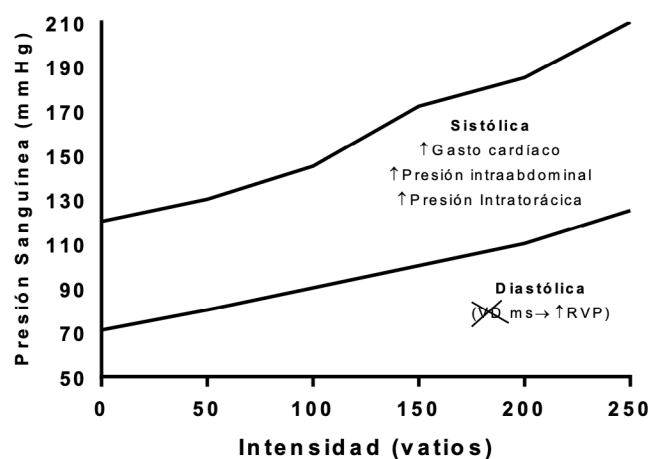


Figura 4. Respuesta de la presión arterial al ejercicio estático o de fuerza intensa. VD ms: vasodilatación muscular; RVP: resistencia vascular periférica.

La siguiente tabla muestra valores de presión arterial de un estudio que utilizó un transductor conectado a un catéter ubicado en la arteria femoral. Las mediciones fueron hechas durante tres formas de ejercicio: (1) Isométrico o estático *press-banca* desarrollado a un 25%, 50% y 75% de la contracción voluntaria máxima (CVM); (2) Anisométrico o dinámico *press-banca* libre de peso desarrollado a un 25% y 50% de la CVM isométrica, y (3) *Press-banca* con resistencia hidráulica desarrollada durante todo el rango de movimiento por 20 segundos, a una velocidad lenta y rápida.

Tabla 2. Comparación de los valores de presión arterial sistólica y diastólica a diferentes porcentajes de contracción muscular máxima voluntaria (CMV) durante un ejercicio isométrico, un ejercicio de prensa en banca con peso libre y un ejercicio de prensa en banca hidráulica.

	Isométrico ^a (% CMV)				Prensa en banca con peso libre ^b (% CMV)		Prensa en banca hi- dráulica ^c	
Condición	25	50	75	100	25	50	Lento	Rápido
Peak sistólico, mm Hg	172	179	200	225	169	232	237	245
Peak diastólico, mm Hg	106	116	135	156	104	154	154	160

Los valores son promedios para siete sujetos. Datos de Freedson PF, *et al.* Presión arterial intraarterial durante el peso libre y ejercicio de resistencia hidráulica.

Med Sci Sports Exer 1984;16:131 y datos no publicados del *Human Performance Laboratory*, Departamento de Ciencias del Ejercicio, Universidad de Massachusetts, Amherst, MA.

^a Glotis abierta (sin maniobra de Valsalva): promedio de dos pruebas; tiempo de contracción 2 a 3 segundos; posición del brazo de ejercicio de prensa de banca con las manos por encima del pecho.

^b El peso levantado fue de 25% o 50% de la acción máxima isométrica determinada previamente.

^c Realizado en el aparato de presión de pecho de Hydra-Fitness®, con el ajuste de marcación 3 (lento) y 5 (rápido) durante 20 segundos de acciones máximas repetidas

Los resultados muestran claramente que los tres tipos de ejercicios aumentan el valor de presión arterial y el correspondiente trabajo cardiaco (doble producto). Este gran aumento de la respuesta de la presión arterial resulta de la combinación de los efectos de (1) estimulación del centro cardiovascular por las áreas activas de la corteza motora y (2) la gran retroalimentación periférica a este centro de la contracción de la masa muscular.

Es importante considerar que estas elevadas presiones arteriales no comprometen la integridad de la pared arterial, ya que están destinadas a mantener la luz del vaso abierta, pero no provocan una dilatación excesiva del conducto

El entrenamiento físico tiene efectos importantes sobre los valores de presión arterial sistólica y diastólica durante el ejercicio. El entrenamiento de resistencia aeróbica tiende a disminuir las cifras en reposo y durante ejercicios submáximos de la presión arterial sistólica, diastólica y media; mientras que en ejercicios máximos solo se reducen la presión diastólica y media, pero no la sistólica.

Referencias

1. Schultz MG, La Gerche A, Sharman JE. Blood Pressure Response to Exercise and Cardiovascular Disease. Vol. 19, Current Hypertension Reports. Current Medicine Group LLC 1; 2017.
2. Miyai N, Arita M, Morioka I, Miyashita K, Nishio I, Takeda S. Exercise BP response in subjects with high-normal BP: Exaggerated blood pressure response to exercise and risk of future hypertension in subjects with high-normal blood pressure. J Am Coll Cardiol. 2000 Nov 1;36(5):1626–31.
3. Currie KD, Floras JS, La Gerche A, Goodman JM. Exercise Blood Pressure Guidelines: Time to Re-evaluate What is Normal and Exaggerated? Sport Med [Internet]. 2018 Aug 1 [cited 2021 Mar 13];48(8):1763–71. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29574665/>
4. Sharman JE, Lagerche A. Exercise blood pressure: Clinical relevance and correct measurement [Internet]. Vol. 29, Journal of Human Hypertension. Nature Publishing Group; 2015 [cited 2021 Mar 13]. p. 351–8. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25273859/>
5. Tanaka H, Bassett DR, Turner MJ. Exaggerated blood pressure response to maximal exercise in endurance-trained individuals. Am J Hypertens. 1996;9(11):1099–103.
6. Jurens TL, From AM, Kane GC, Mulvagh SL, Pellikka PA, McCully RB. An exaggerated blood pressure response to treadmill exercise does not increase the likelihood that exercise echocardiograms are abnormal in men or women. J Am Soc Echocardiogr. 2012 Oct;25(10):1113–9.

7. Boutcher YN, Boutcher SH. Exercise intensity and hypertension: What's new? [Internet]. Vol. 31, Journal of Human Hypertension. Nature Publishing Group; 2017 [cited 2021 Mar 13]. p. 157–64. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27604656/>
8. Laukkanen JA, Kurl S. Blood pressure responses during exercise testing is up best for prognosis? Vol. 44, Annals of Medicine. 2012. p. 218–24.
9. Laskey WK, Parker HG, Ferrari VA, Kussmaul WG, Noordergraaf A. Estimation of total systemic arterial compliance in humans. J Appl Physiol [Internet]. 1990 [cited 2021 Mar 13];69(1):112–9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2394640/>
10. Nichols WW. Clinical measurement of arterial stiffness obtained from noninvasive pressure waveforms. Am J Hypertens. 2005;18(1 SUPPL.):3–10.
11. Belz GG. Elastic properties and Windkessel function of the human aorta. Vol. 9, Cardiovascular Drugs and Therapy. Kluwer Academic Publishers; 1995. p. 73–83.
12. Nichols WW, Edwards DG. Arterial elastance and wave reflection augmentation of systolic blood pressure: Deleterious effects and implications for therapy. Vol. 6, Journal of Cardiovascular Pharmacology and Therapeutics. Westminister Publications Inc.; 2001. p. 5–21.
13. Dart AM, Kingwell BA. Pulse pressure - A review of mechanisms and clinical relevance. J Am Coll Cardiol [Internet]. 2001 Mar 15 [cited 2021 Mar 13];37(4):975–84. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11263624/>

Presión arterial y respuesta hemodinámica durante el ejercicio

En el grupo debiera haber dos sujetos voluntarios a desarrollar las actividades prácticas: uno realizará ejercicio dinámico y el otro el estático.

a) Ejercicio dinámico

El voluntario realizará ejercicio dinámico de trote a una velocidad moderada, consistente en recorrer cinco vueltas a la pista de carrera de 400 m. Los compañeros del grupo realizarán el registro de la presión arterial (método auscultatorio), frecuencia cardíaca y frecuencia respiratoria, simultáneamente, en las siguientes etapas: reposo previo a actividad, post una vuelta (400 m), post tres vueltas (1 200 m), post cinco vueltas (2 000 m) y cada 2 minutos una vez finalizada la prueba hasta que los valores de presión arterial sean similares a los de reposo.

b) Ejercicio estático

El voluntario realizará ejercicio estático de prensa o *press* de pierna (contracción isométrica de grupos musculares en contra de pesas), durante el periodo de tiempo que los compañeros necesiten para registrar adecuadamente la presión arterial (en actividad), frecuencia cardíaca y frecuencia respiratoria.

El registro de los parámetros hemodinámicos mencionados anteriormente debe realizarse en condiciones de reposo, de actividad y posejercicio (3, 5, y 10 minutos). Durante esta última etapa debe realizarse el registro hasta que los valores de presión arterial sean similares a los obtenidos en condiciones de reposo.

Los compañeros del grupo deben asegurarse de que el ejercicio de prensa de pierna no se realice en apnea (sin respirar), evitando así una ejecución involuntaria de la maniobra de Valsalva (compresión del tórax con la vía aérea cerrada), ya que esto haría aumentar más aún la presión arterial.

c) Responda las siguientes preguntas:

- 1) ¿Qué es la presión sanguínea arterial?
- 2) ¿A nivel de qué vasos sanguíneos se regula principalmente la presión arterial?
- 3) ¿Cómo se calcula la: a) presión arterial media; b) diferencial y/o de pulso.
- 4) ¿Qué sucede con los diferentes valores de presión arterial (sistólica, diastólica, media, y de pulso) al realizar ejercicio físico de resistencia?
- 5) ¿Qué sucede con los diferentes valores de presión arterial (sistólica, diastólica, media, y de pulso) al realizar ejercicio físico de resistencia?

GUÍA DE TRABAJO

Presión arterial

I. Respuestas hemodinámicas al ejercicio físico (ejercicio dinámico).

Género: (M)____ Edad (años): ____ Estatura (cm): ____ Peso (kg): ____
(F)____

Tiempo	PAS	PAD	PAM	FC	FR
Reposo					
Una vuelta					
Tres vueltas					
Cinco vueltas					
Posejercicio					
2 min Posejercicio					
4 min Posejercicio					
6 min Posejercicio					
8 min Posejercicio					
10 min Posejercicio					

II. Respuestas hemodinámicas al ejercicio físico (ejercicio estático).

Género: (M)____ Edad (años): ____ Estatura (cm): ____ Peso (kg):____
(F)____

Tiempo	PAS	PAD	PAM	FC	FR
Reposo					
Reposo					
Ejercicio					
Posejercicio					
2 min Posejercicio					
4 min Posejercicio					
6 min Posejercicio					
8 min Posejercicio					
10 min Posejercicio					



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

CAPÍTULO 6

FUNDAMENTOS FISIOLÓGICOS DE LA VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDIACA

AUTOR

Felipe A. Contreras Briceño

RESUMEN

Es muy común valorar la frecuencia cardíaca como indicador de la intensidad del esfuerzo de un ejercicio físico, como también, reconocer la disminución de su valor en reposo producto del entrenamiento; sin embargo, el análisis del valor absoluto de la frecuencia cardíaca deja de lado la importancia fisiológica de los mecanismos que la regulan, específicamente el control que ejerce el sistema nervioso autónomo a través de sus ramas simpática y parasimpática. En este capítulo se describen los fundamentos fisiológicos que regulan la variabilidad del ritmo o frecuencia cardíaca, aspecto de gran interés, sobre todo, para valorar estados de sobrentrenamiento en los deportistas, con el objetivo de que preparadores o entrenadores físicos la reconozcan como una herramienta evaluativa sencilla, no invasiva y factible de incorporar en la práctica profesional cuando se cuestione el rendimiento de los deportistas.

1. Introducción

El sistema nervioso autónomo (SNA) controla las funciones involuntarias del sistema corporal. Existen dos ramas autonómicas, el sistema nervioso autónomo simpático (SNAS) y el sistema nervioso autónomo parasimpático (SNAP), que realizan funciones con efectos antagónicos en su control sobre ciertas funciones corporales. Una de las áreas de acción del SNA es el control de la frecuencia cardíaca (FC), siendo capaz de influir en el ritmo cardíaco ejercido por el nodo sinusal (NS).

La cadencia de latidos del corazón (frecuencia cardíaca) puede ser influenciada por diferentes factores, los cuales le otorgan cierta variabilidad, donde se destacan la acción de la ventilación pulmonar, el control de la presión arterial, la termorregulación y el sistema renina angiotensina aldosterona¹⁻³. Un método que registra la variabilidad en la duración del intervalo entre latidos cardíacos consecutivos es el análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC). La VFC se define como la heterogeneidad en los intervalos de tiempo entre latidos cardíacos sucesivos originados a nivel del NS¹.

A continuación, se presentan algunos conceptos celulares, moleculares y matemáticos, para la comprensión biológica de las bases de la variabilidad de la frecuencia cardíaca.

2.Marco teórico

El ritmo automático del nodo sinusal guarda relación con la activación alternante de diferentes corrientes iónicas, tanto de entrada como de salida, a nivel celular. Dentro de las corrientes participantes en dicho lugar, se pueden mencionar corrientes de calcio tipo L ($I_{Ca^{+2}L}$), corrientes de calcio tipo T ($I_{Ca^{+2}T}$), corrientes de potasio ($I_{K^{+}}$) y corriente de entrada activada por hiperpolarización (I_{funny}), entre otras^{4,5}.

Esta activación alternante de corrientes eléctricas a través de los diferentes canales iónicos conlleva a una oscilación del potencial de membrana, determinando que al alcanzar el umbral necesario se gatille el potencial de acción. Si bien el ritmo de descarga del nodo sinusal es relativamente regular, este puede ser modulado por diferentes factores, los que otorgan cierta variabilidad^{6,7}. Una de las herramientas no invasivas para cuantificar esta variabilidad es la obtención del registro de la actividad eléctrica o mecánica del corazón y el análisis matemático de la variabilidad del tiempo transcurrido entre latidos consecutivos, tomando como referencia cualquiera de las fases del ciclo cardíaco.

3. Variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC)

La evaluación de la VFC representa un marcador experimental no invasivo de la actividad autonómica del corazón, que ha nacido frente a la necesidad de encontrar una asociación entre la tendencia a arritmias letales con signos de actividad simpática aumentada o actividad vagal disminuida. La evaluación de la VFC se define como el reporte de las oscilaciones del intervalo de tiempo existente entre latidos cardiacos consecutivos o como la oscilación entre frecuencias cardiacas consecutivas instantáneas⁸. Puede ser calculada a partir de cualquier señal que identifique un evento dado del ciclo cardiaco, ya sean ruidos, imágenes ecocardiográficas o *doppler* y otras formas de registro de la actividad cardiaca. Sin embargo, el electrocardiograma (ECG) es la herramienta más usada en virtud de su amplia difusión y fiabilidad.

Si se registran las señales biológicas producto del ritmo cardiaco, el complejo QRS (que representa la rápida despolarización de ambos ventrículos) es la parte central del registro y proporciona una señal visualmente más llamativa que las ondas P (despolarización auricular) o T (repolarización ventricular). De este complejo, la onda R representa la referencia más conspicua por su mayor amplitud (debido a la mayor masa ventricular) y por ello se suele tomar como referencia con una letra R. Al proseguir el registro, se obtienen al cabo de cierto tiempo varios puntos, que van desde R_1 hasta R_n , siendo “n” el número de latidos registrados, los que corresponden a los diferentes complejos QRS que aparecen en el registro del ECG. Del tiempo transcurrido entre una onda R y la siguiente R se obtiene un intervalo de tiempo $T_{(n)}$. Es decir, para cada distancia de registro entre R-R consecutivos se puede obtener un tiempo $T_{(x)}$.

Es frecuente que se identifiquen los intervalos entre latidos como intervalos R-R, o también como intervalos N-N (por normal-normal), lo que señala que para calcular la VFC se usan ondas R “normales”, entendiendo como tales solo aquellas originadas a nivel de nodo sinusal. La serie de intervalos de tiempo entre R-R brinda variables estadísticas, las cuales otorgan la información correspondiente al dominio tiempo del registro de la VFC. A la vez, si se relacionan los diferentes tiempos entre R-R consecutivos y el tiempo $T_{(x)}$ transcurrido, se puede obtener información respecto de las características de las frecuencias de dicho registro. El proceso de obtención de datos se ilustra en la figura 1:

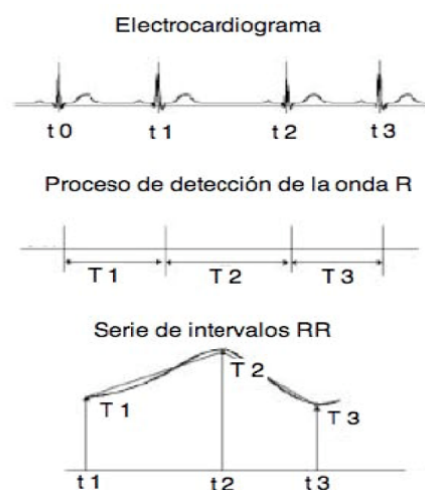


Figura 1. La señal de la VFC se obtiene detectando la onda R en t_i y calculando el tiempo consecutivo entre dos ondas R o $T(i)$. Los tiempos t_i y $T(i)$ se usan para reconstruir la amplitud y frecuencia de la serie de intervalos R-R.

Al graficar la duración de los intervalos R-R de acuerdo con el número de latidos, se obtiene el registro base para el análisis en el dominio frecuencia de la VFC, denominado tacograma. Este registro se grafica en la figura 2.

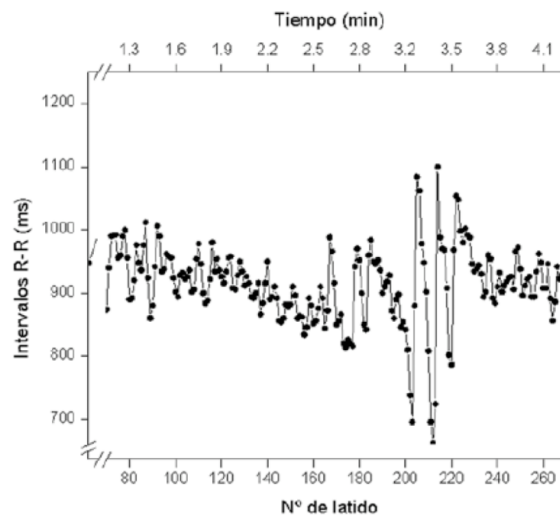


Figura 2. Tacograma formado por la disposición de los intervalos R-R en función del número de latidos.

3.1 Mediciones en el dominio tiempo

La serie de valores analizables provenientes del registro de frecuencias cardiacas instantáneas o intervalos R-R se pueden dividir en dos clases: aquellos derivados de mediciones directas de intervalos o aquellos derivados de las diferencias entre ellos. Dentro de los registros más utilizados en el dominio tiempo, se puede mencionar el SDNN, cual es la desviación estándar de los intervalos R-R. Este valor es igual a la raíz cuadrada de la varianza de la potencia o registro total; como la varianza es igual matemáticamente a la potencia total del análisis espectral, SDNN refleja todo el componente cíclico de variabilidad en el periodo de registro. La varianza o potencia total del registro del análisis espectral depende del periodo de registro que se analice (24 horas o 5 minutos); por lo anterior, no son comparables mediciones de SDNN obtenidas de registros de diferente duración^{8, 9}. Dentro de las mediciones provenientes de las diferencias de los intervalos se encuentran: RMSSD, NN50 y pNN50. El valor de RMSSD representa a la raíz cuadrada del promedio de las diferencias al cuadrado de intervalos sucesivos R-R; el valor NN50 representa al número de intervalos sucesivos cuya diferencia es mayor a 50 ms, y el valor de pNN50 representa a la proporción derivada de dividir el NN50 por el número total de intervalos NN.

3.2 Mediciones en el dominio frecuencia

El análisis de la densidad espectral provee información de cómo la potencia se distribuye en función de la frecuencia. Para realizar el estudio espectral, el perfil del tacograma se trata como una señal compuesta por múltiples ondas de diferentes frecuencias. Independiente del método empleado, todo análisis de la densidad espectral de la potencia utiliza algoritmos matemáticos⁸.

Considerando que la VFC puede cambiar sus componentes en el dominio de las frecuencias en relación con el estado fisiológico del sujeto y/o a cambios en las condiciones ambientales, se pueden utilizar dos métodos para analizar el espectro de frecuencia: el análisis mediante el proceso de transformada rápida de Fourier y el análisis mediante el modelo autorregresivo de multiparámetros de la serie de tiempo⁸.

3.3 Transformada rápida de Fourier (TRF)

La TRF es un algoritmo matemático útil en el análisis y diseño de señales. Este implica básicamente la descomposición de una señal registrada en el tiempo en términos de componentes sinusoidales; al realizar esta descomposición, se dice que la señal está representada en el dominio de la frecuencia. La mayor parte de las señales de interés práctico se pueden descomponer en la suma de componentes sinusoidales. El objetivo básico al desarrollar análisis frecuencial es otorgar una representación matemática y esquemática de los componentes contenidos en cierta señal, que no son evidentes de analizar en el dominio tiempo. Para referirse al contenido en frecuencia de una señal, se emplea el término espectro.

Un ejemplo de análisis frecuencial es la utilización de un prisma para descomponer la luz solar en los colores del arcoíris. Las formas de onda que

nos interesan son básicamente funciones temporales: si se descompone una forma de onda en sus componentes sinusoidales, de forma similar a como un prisma separa la luz blanca en sus diferentes colores, la suma de estos componentes sinusoidales resulta en la forma de onda original.

De forma similar, podemos pensar que el ritmo cardíaco va a modificarse por efecto de factores anatómicos y señales de retroalimentación (el cambio de volumen torácico por el ciclo de la ventilación pulmonar, los reflejos barorreceptores y la modulación por parte del SNA). Una vez obtenido el tacograma respectivo, los datos son sometidos al análisis de la TRF, realizando su descomposición con múltiples ondas sinusoidales, obteniendo así los diferentes componentes del dominio frecuencia. Si bien el análisis frecuencial otorga una representación esquemática de los componentes involucrados en la señal, esta no es capaz de señalar en qué período de tiempo del registro de esa señal fue preponderante el componente frecuencial respectivo, es decir, se pierde notificación temporal para los diferentes componentes frecuenciales involucrados.

Un aspecto técnico importante de mencionar es relativo al muestreo de la señal: este debe tener un refresco adecuado para reconstruir la señal analógica a partir de las muestras tomadas. De acuerdo con el teorema de muestreo de Nyquist, una señal solo puede muestrearse apropiadamente si carece de componentes de frecuencia mayores a la mitad de la propia frecuencia de muestreo. Por ejemplo, si se muestrea a 1 Hz (una vez cada segundo), se requiere que la señal analógica esté compuesta de frecuencias menores a 0.5 Hz. Si existen componentes de frecuencias en la señal por encima de este límite, estos componentes no se detectarán y, además, se combinarán con los componentes de frecuencias más bajas, fenómeno que se denomina *aliasing*.

A continuación (figura 3), se grafica el esquema de registro de la VFC y su posterior dominio frecuencial tras procesarse la señal mediante el análisis de TRF.

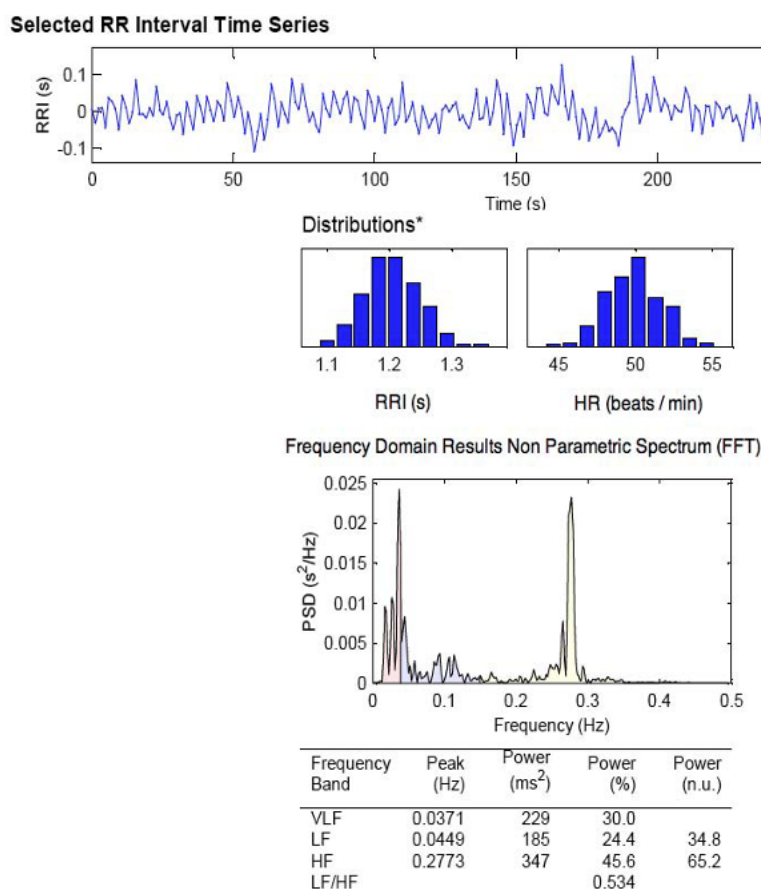


Figura 3. Representación del dominio frecuencia tras el posterior análisis del tacograma mediante el proceso de transformada rápida de Fourier de la VFC (*HRV analysis software by biomedical signal analysis group, Universidad de Kuopio – Finlandia*).

4. Componentes espectrales

Se han descrito distintos espectros de frecuencia relacionados con la actividad del sistema nervioso autónomo. Los valores comprendidos entre 0.04 y 0.15 Hz (correspondientes a fenómenos con periodos entre 7 y 25 s) se denominan componentes de baja frecuencia (BF), o *low frequency* (LF), los cuales se relacionan principalmente con actividad del SNAS. Los valores entre 0.15 y 0.40 Hz (correspondientes a periodos entre 7 y 2.5 s) se denominan componentes de alta frecuencia (AF), o *high frequency* (HF), los cuales se asocian principalmente a la actividad del SNAP. El análisis también entrega la relación entre los dos componentes, baja y alta frecuencia (BF/AF o LF/HF), y esa proporción es utilizada para indicar el balance y predominancia entre el SNAS y SNAP en condiciones controladas. De esta manera, una disminución en este valor podría indicar tanto un aumento en la actividad parasimpática como una disminución en la actividad simpática, y viceversa. Existe, además, el denominado componente de muy baja frecuencia (MBF), o *very low frequency* (VLF), que se encuentra en el rango entre 0.003 y 0.040 Hz (periodos de 333 hasta 25 s); la relación de esta zona del espectro con algún componente fisiológico no está clara y aún es motivo de estudio en la literatura, por lo que su interpretación hoy debe evitarse.

La tabla 1 presenta los valores de frecuencia de cada uno de los componentes para un análisis espectral, mediante TRF, junto con las relaciones que se pueden obtener.

Tabla 1. Mediciones seleccionadas en el dominio frecuencia de VFC.

Variables	Descripción	Frecuencias
Potencia total 5 min (ms^2)	La varianza de intervalos R-R (desde un complejo QRS normal a otro QRS normal) sobre el segmento temporal	Aproximadamente ≤ 0.04 Hz
MBF (ms^2)	Potencia en el rango de muy baja frecuencia (MBF)	≤ 0.04 Hz
BF (ms^2)	Potencia en el rango de baja frecuencia (BF)	0.04-0.15 Hz
BF normalizada (u. n.)	Potencia de BF en unidades normalizadas: $(\text{BF}/(\text{potencia-total-MBF})) * 100$	-
AF (ms^2)	Potencia en el rango de alta frecuencia	0.15-0.4 Hz
AF normalizada (u. n.)	Potencia de AF en unidades normalizadas: $(\text{AF}/(\text{potencia total-MBF})) * 100$	-
BF/AF	Razón entre baja frecuencia y alta frecuencia	-

Las mediciones de los anchos de frecuencias pueden ser registradas como valores absolutos de potencia (varianza expresada en ms^2), pero también pueden ser expresadas en unidades normalizadas, las cuales representan el valor relativo de cada componente de potencia en proporción a la potencia total menos el componente de muy baja frecuencia. La representación de baja y alta frecuencia en unidades normalizadas tiende a enfatizar el control y balance del comportamiento de las dos ramas del sistema nervioso autónomo.

Como se aprecia en la figura 4, el procedimiento de normalización de los componentes frecuenciales de la VFC tiende a minimizar los efectos de los cambios en la potencia total sobre los valores de baja y alta frecuencia⁸.

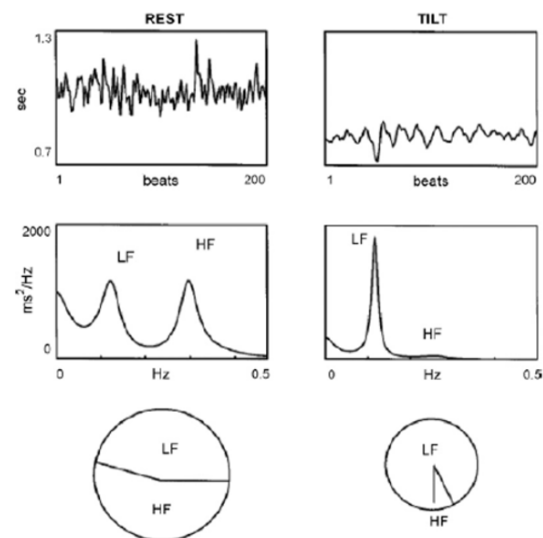


Figura 4. Se presenta el análisis espectral de la variabilidad de los intervalos R-R en sujetos sanos, en reposo y con maniobras de *tilt head up test* (prueba de estimulación simpática). En reposo (panel izquierdo) se observan dos principales componentes de frecuencia: baja frecuencia (BF) y alta frecuencia (AF), con una potencia similar. Durante la maniobra de estimulación simpática (panel derecho), el componente de BF es dominante, pero la potencia total (varianza) es menor, por lo que la potencia absoluta de BF parece no modificarse en comparación con el reposo. El procedimiento de normalización de las unidades lleva a que los componentes del análisis espectral expresen la predominancia del componente de BF y la disminución del componente de AF. Los gráficos de torta que aparecen en la parte inferior expresan la distribución relativa de ambos componentes con su potencia absoluta representados por el área. Lo anterior demuestra la importancia de señalar los valores en unidades normalizadas. Figura extraída de *Task Force HRV*⁶.

5. Correlación fisiológica de los componentes frecuenciales de la VFC

Tanto la actividad vagal como la simpática interactúan constantemente de forma activa. La estimulación aferente vagal lleva a una excitación refleja de la actividad eferente vagal y a una inhibición de la eferente simpática. Los efectos opuestos son mediados por la estimulación de la actividad aferente simpática. La actividad eferente vagal también está bajo una restricción tónica por la actividad aferente simpática cardíaca. La actividad eferente simpática y vagal directa sobre el nodo sinusal están caracterizadas por descargas sincrónicas con cada ciclo cardíaco, lo cual puede estar modulado por oscilaciones centrales (centros vasomotor y respiratorio) y periféricos (oscilación en presión arterial y movimientos respiratorios). Estas oscilaciones generan fluctuaciones rítmicas en la descarga de eferentes neurales, las que se manifiestan en oscilaciones de corto o largo plazo¹⁰.

Para entender cómo los mecanismos neurales eferentes ejercen su efecto sobre el nodo sinusal modificando los valores de la VFC, es necesario entender las bases del análisis espectral de esta variable.

Como se muestra en la figura 5, la actividad eferente vagal es la que contribuye al componente de alta frecuencia (AF); esto se ha visto en maniobras clínicas de estimulación eléctrica vagal, bloqueo de los receptores muscarínicos, vagotomía, respiración controlada, estimulación con frío en el rostro y estímulos rotacionales^{11, 12}.

La interpretación del componente de baja frecuencia (BF) se asocia a la modulación simpática; se observa un aumento de esta en maniobras de bipedestación, estrés mental, hipotensión moderada, durante la actividad física u oclusión de una arteria coronaria.

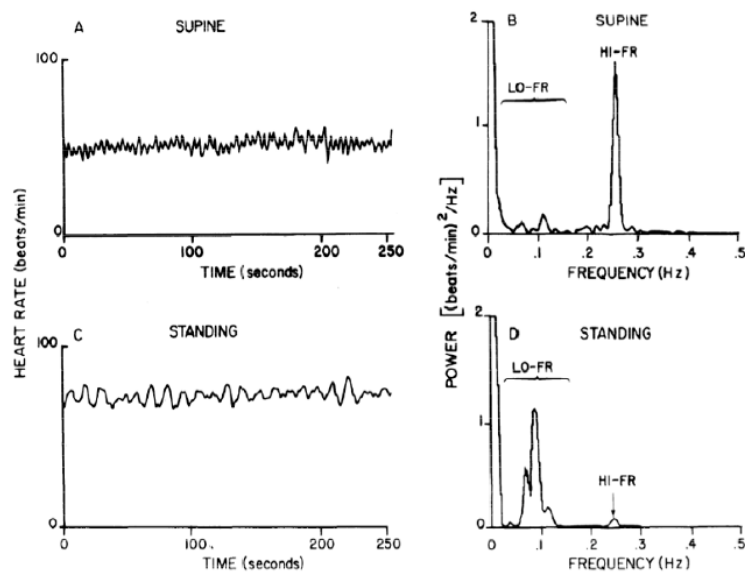


Figura 5. Respuestas de la frecuencia cardiaca a cambios en la postura: a) Posición supina: prepondera el componente de AF por control parasimpático de la frecuencia respiratoria. b) Análisis espectral de VFC en posición supina, se demuestra el gran componente de AF y el menor de BF. c) Posición bípeda: prepondera el componente de BF por estimulación simpática. d) Análisis espectral de VFC en posición bípeda, se demuestra el gran componente de BF y el menor de AF. Figura extraída de Pomeranz, et al¹³.

Con la estimulación simpática se libera adrenalina y noradrenalina desde las terminales nerviosas a nivel local; la recaptura del neurotransmisor por esas terminaciones, proceso llamado de “lavado” (*wash out*) o de aclaramiento sanguíneo, es relativamente lento. Los efectos de estas catecolaminas liberadas pueden mantenerse hasta por dos minutos; tras ese periodo, el corazón puede retornar a su condición previa al estímulo^{8, 12}.

Por otra parte, debido a la gran cuantía de la enzima acetilcolinesterasa presente en el nodo sinusal, el efecto de cualquier impulso vagal está condicionado a un breve periodo de acción gracias a la rápida hidrólisis del neurotransmisor. La influencia parasimpática excede los efectos simpáticos por medio de dos mecanismos independientes: colinérgicamente induce una reducción de la norepinefrina o noradrenalina liberada en respuesta a

la actividad simpática; y por otra parte, ocurre una atenuación colinérgica de las respuestas a estímulos adrenérgicos⁸.

Teniendo en consideración la propiedad de automatismo de las células del nodo sinusal y relacionándola con los diferentes mecanismos fisiológicos por los cuales el sistema nervioso autónomo puede regular la frecuencia cardíaca, se puede afirmar que existen tres mecanismos por los cuales se modula la frecuencia de descarga del NS: modificando la pendiente de la fase de prepotencial, modificando el potencial diastólico máximo y modificando el potencial umbral. Se sabe que el aumento de la frecuencia cardíaca ocasionada por la acción del sistema nervioso simpático se debe a mecanismos intracelulares involucrados por la unión de las catecolaminas con los receptores b-adrenérgicos. Esta unión ocasiona la activación de una proteína G tipo S (estimulante), la cual mediante la acción sobre la enzima adenilatociclasa (AC) por su subunidad alfa, ocasiona un aumento de la concentración de adenosín monofosfato cíclico (AMPc), el cual al unirse al canal de la corriente I_{funny} permite la estabilización en la fase de apertura de este, y con ello el aumento de la pendiente de la fase de prepotencial. Este aumento de AMPc también conlleva la activación de la proteína kinasa A (PKA) y con ello, la disminución del potencial umbral gracias a la fosforilación del canal de la corriente $I_{\text{Ca}^{+2}\text{L}}$. Por otra parte, la disminución de la frecuencia cardíaca ocasionada por la acción del sistema nervioso parasimpático por la unión del neurotransmisor de acetilcolina (Ach) sobre el receptor muscarínico tipo 2 (M2) se explica ya que esta unión ocasiona la inhibición por parte de una proteína G tipo I (inhibitoria) sobre la enzima adenilatociclasa (AC), disminuyendo con ello la concentración de AMPc. La disminución de la concentración de AMPc intracelular disminuye la pendiente de la fase de prepotencial, gracias a la estabilización del canal

de la corriente I_{funny} en su estado de cierre. La unión del neurotransmisor Ach sobre el receptor muscarínico también ocasiona la activación de una proteína G, la cual mediante la acción de su subunidad beta-gama activa el canal de la corriente I_{K^+} (Ach), lo que ocasiona la salida del ion potasio (K^+) al medio extracelular y, por tanto, una hiperpolarización de la célula sinusal. Esta hiperpolarización conlleva una disminución del potencial diastólico máximo, ocasionando que a la célula sinusal le tome mayor tiempo llegar al potencial umbral, con el consiguiente retardo en la frecuencia cardíaca.

Las distintas condiciones de aclaramiento de los neurotransmisores junto con los diferentes procesos intracelulares, mediante los cuales las dos ramas del sistema nervioso autónomo modifican la frecuencia cardíaca, son los mecanismos responsables de las respuestas en el dominio frecuencia de la VFC⁸. Cambios en alta frecuencia ocurren cuando el efecto se inicia rápido y finaliza rápido, como ocurre con los cambios inducidos por el sistema parasimpático. Por otra parte, si los efectos — pese a iniciarse rápidos — perduran por un periodo mayor y disminuyen lentamente, presentarán una frecuencia de cambio que sería necesariamente más lenta. Por ello, el sistema nervioso simpático tiene un componente de espectro de frecuencia menor en la variabilidad de la frecuencia cardíaca^{10,14}.

Si bien el sistema nervioso autónomo tiene la capacidad anatómica de influir en la VFC afectando tanto al nodo sinusal como al nodo auriculoventricular (AV), algunos estudios muestran que la contribución del nodo AV en la VFC es casi despreciable, y que será el nodo sinusal el principal responsable de la variabilidad latido a latido^{6, 8, 14}.

6. Diferencias entre frecuencia cardiaca y variabilidad de frecuencia cardiaca

El SNA controla la FC para mantener un ambiente interno estable. Como se explicó anteriormente, el SNAS aumenta la FC; esto implica que el tiempo transcurrido entre cada latido sea menor, por lo tanto, lo más simple de pensar es que al ocurrir esto, la probabilidad de que estos tiempos cardiacos sean distintos entre sí es menor. Sin embargo, resulta perentorio enfatizar que no necesariamente al aumentar la FC, y reducirse consiguientemente el intervalo de tiempo entre latidos cardiacos consecutivos, estos intervalos de tiempo serán más similares entre ellos, ya que es factible que un individuo que presenta una alta FC tenga una mayor VFC en comparación con un individuo que presente una FC más baja.

Finalmente, cabe señalar que un análisis adecuado de la VFC debe realizarse con el sujeto bajo condiciones controladas de acuerdo con las guías¹, es decir, en posición yacente en decúbito supino, ausencia de distracciones, luz tenue, temperatura confortable, etc., y el registro ha de tener una duración suficiente para contabilizar un número de latidos que nos proporcione un análisis estadístico robusto.

Referencias

1. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Eur Heart J [Internet]. 1996 [cited 2021 Mar 14];17(3):354–81. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8737210/>
2. Malik M, John Camm A, Thomas Bigger J, Breithardt G, Cerutti S, Cohen RJ, *et al*. Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Circulation. 1996 Mar 1;93(5):1043–65.
3. Perini R, Veicsteinas A. Heart rate variability and autonomic activity at rest and during exercise in various physiological conditions. Vol. 90, European Journal of Applied Physiology. 2003. p. 317–25.
4. Ono K, Shibata S, Iijima T. Pacemaker mechanism of porcine sino-atrial node cells. J Smooth Muscle Res [Internet]. 2003 Oct;39(5):195–204. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14695029>
5. Satoh H. Sino-atrial nodal cells of mammalian hearts: ionic currents and gene expression of pacemaker ionic channels. J Smooth Muscle Res [Internet]. 2003 Oct;39(5):175–93. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14695028>
6. Schwab JO, Eichner G, Schmitt H, Weber S, Coch M, Waldecker B. The relative contribution of the sinus and AV node to heart rate variability. Heart [Internet]. 2003 Mar [cited 2014 Jan 30];89(3):337–8. Available from: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1767597&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>

7. Parati G, Di Rienzo M. Determinants of heart rate and heart rate variability. *J Hypertens* [Internet]. 2003 Mar [cited 2014 Jan 30];21(3):477–80. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12640235>
8. Camm A, Malik M. Heart rate variability Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. ... *Hear J* [Internet]. 1996 [cited 2014 Jan 31];354–81. Available from: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Heart+rate+variability+Standards+of+measurement,+physiological+i nterpretation,+and+clinical+use#3>
9. La Rovere MT. Short-Term Heart Rate Variability Strongly Predicts Sudden Cardiac Death in Chronic Heart Failure Patients. *Circulation* [Internet]. 2003 Jan 13 [cited 2014 Jan 29];107(4):565–70. Available from: <http://circ.ahajournals.org/cgi/doi/10.1161/01.CIR.00000047275.25795.17>
10. Spyer KM. Annual review prize lecture. Central nervous mechanisms contributing to cardiovascular control. *J Physiol* [Internet]. 1994 Jan 1 [cited 2014 Jan 27];474(1):1–19. Available from: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1160290&tool=pmcentrez&rendertype=abstract>
11. Malliani A, Pagani M, Lombardi F, Cerutti S. Cardiovascular neural regulation explored in the frequency domain. *Circulation* [Internet]. 1991 Aug 1 [cited 2014 Jan 24];84(2):482–92. Available from: <http://circ.ahajournals.org/cgi/doi/10.1161/01.CIR.84.2.482>

12. Montano N, Porta A, Cogliati C, Costantino G, Tobaldini E, Casali KR, *et al*. Heart rate variability explored in the frequency domain: a tool to investigate the link between heart and behavior. *Neurosci Biobehav Rev* [Internet]. 2009 Mar [cited 2014 Jan 29];33(2):71–80. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18706440>
13. Pomeranz B, Macaulay RJ, Caudill MA, Kutz I, Adam D, Gordon D, *et al*. Assessment of autonomic function in humans by heart rate spectral analysis. *Am J Physiol* [Internet]. 1985 Jan [cited 2014 Jan 31];248(1 Pt 2):H151-3. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3970172>
14. Akselrod S, Gordon D, Ubel FA, Shannon DC, Berger AC, Cohen RJ. Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science* [Internet]. 1981 Jul 10 [cited 2014 Jan 31];213(4504):220–2. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/6166045>

Variabilidad de la frecuencia cardiaca

Objetivo:

Aprender el manejo del instrumental de valoración de la VFC, para posteriormente realizar una correcta evaluación e interpretación de este parámetro autonómico en un estado de reposo en sujetos sanos.

Instrucciones:

De acuerdo con los contenidos de clases y a los antecedentes aportados por el presente documento, debe realizar una evaluación e interpretación de la VFC en un sujeto sano, basándose en los siguientes pasos. Para el registro de la variabilidad de la frecuencia cardiaca, el voluntario debe cumplir con las siguientes condiciones:

- No tener alguna enfermedad cardiaca diagnosticada.
- No haber realizado actividad física en las 24 horas previas al registro.
- No haber ingerido alimentos que contengan cafeína (p. ej.: bebidas, café, etc.).
- No estar cursando con algún cuadro infeccioso.
- Antecedente de enfermedad inflamatoria crónica o recurrente.
- Tratamiento actual con anticoagulantes o esteroides.

Una vez que se selecciona adecuadamente al voluntario, este debe permanecer en posición decúbito supino (acostado) durante el registro de la actividad.

Los compañeros deben limpiar con algodón con alcohol la zona anterior del tórax cercana al ángulo de Louis (a nivel de la segunda costilla), unos 2 a 5 cm, tanto hacia el lado izquierdo como derecho (zona en contacto con los electrodos del cinturón de registro cardiaco).

Enseguida, deben humedecer con abundante agua la zona de los electrodos de registro del cinturón de monitor cardiaco.

Verificar que el cinturón de registro cardiaco quede correctamente adosado al tórax del voluntario, no dificultando o modificando el patrón respiratorio de este.

Colocar adecuadamente el sensor de registro de latidos cardiacos del cinturón de monitor cardiaco.

Asegurarse de que el reloj de registro cardiaco *POLAR RS-800cx* (monitor portátil de registro de frecuencia cardiaca) esté configurado para la medición de los intervalos R-R (VFC).

El voluntario deberá permanecer, por lo mínimo, cinco minutos en posición decúbito supino respirando tranquilamente; mientras que los compañeros deberán percatarse del ritmo respiratorio que adopte.

Para finalizar, los datos registrados serán analizados por el profesor guía de la actividad práctica.



a)



b)

Figura. a) Reloj de registro cardiaco *POLAR RS-800cx*; b) Cinturón de registro cardiaco.

Variabilidad de la frecuencia cardiaca

Nombre: _____

Género: (M)____ Edad (años): ____ Estatura (cm):____Peso (kg):____
(F)____

- **Registro general:**

Frecuencia cardiaca: _____ $\bar{X}$ (lpm)

_____ (d. s.) (lpm)

Frecuencia respiratoria: _____ (rpm)

Presión arterial:

PAS (presión arterial sistólica) _____ (mm Hg)

PAD (presión arterial diastólica) _____ (mm Hg)

PAM (presión arterial media) _____ (mm Hg)

- **Componentes espectrales de VFC (dominio frecuencia)**

BF (baja frecuencia o *low frequency* (LF)) _____ u. n.

AF (alta frecuencia o *high frequency* (HF)) _____ u. n.

BF / AF (razón entre baja frecuencia y alta frecuencia) _____

Potencia BF _____ (ms²)

Potencia AF _____ (ms²)



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

CAPÍTULO 7

DETERMINANTES DEL UMBRAL LÁCTICO Y DE LA CAPACIDAD AERÓBICA MÁXIMA

AUTOR

Felipe A. Contreras Briceño

RESUMEN

La máxima capacidad física aeróbica o consumo de oxígeno máximo ($\dot{V}O_2$ máx.) es uno de los principales parámetros funcionales a determinar por parte de fisiólogos del ejercicio y entrenadores, pues ha sido reconocido como uno de los más confiables indicadores del rendimiento deportivo; sobre todo, en ejercicios de resistencia física, o *endurance*, como el triatlón, maratón, ciclismo de fondo, remo, etc. La forma objetiva de evaluar el $\dot{V}O_2$ máx. es a través del análisis de variables ventilatorias y gases exhalados a través del método respiración por respiración. Este capítulo se enfoca en analizar los factores que determinan o condicionan el $\dot{V}O_2$ máx., como también comprender la utilidad para prescribir o dosificar el ejercicio a través de los cambios de variables fisiológicas registradas en los protocolos de medición para determinar el $\dot{V}O_2$ máx.

1. Introducción

El consumo de oxígeno máximo ($\dot{V}O_2$ máx.) se define como la cantidad máxima de oxígeno que el organismo es capaz de absorber, transportar y consumir por unidad de tiempo, es decir, es la tasa máxima de producción de energía proporcionada por el sistema aeróbico, de ahí su denominación a capacidad aeróbica máxima¹⁻³. Su valor, normalmente, se expresa en cantidades absolutas ($\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$), pero también se puede expresar en cantidades relativas considerando el peso corporal ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), lo que es más útil para deportes en donde el efecto de la gravedad es relevante para el rendimiento deportivo (p. ej.: corredores, ciclistas, triatletas). En la literatura también es factible encontrar sinónimos a consumo de oxígeno máximo, siendo los más habituales: potencia aeróbica máxima, máxima captación de oxígeno, máxima capacidad cardiorrespiratoria, capacidad de *endurance* cardiorrespiratorio, entre otros²⁻⁴.

Como se mencionó previamente, existe gran interés en cierto tipo de disciplinas deportivas en alcanzar valores elevados de $\dot{V}O_2$ máx., pues es común asociarlo a rendimiento deportivo; sin embargo, conviene recordar que existe gran variabilidad entre diferentes sujetos y disciplinas deportivas, las que pueden atribuirse a factores genéticos, edad, composición corporal, género y grado de entrenabilidad o acondicionamiento físico⁴⁻⁷, por lo que su interpretación requiere un análisis específico y debe ser realizado por personal calificado (valores de referencia de consumo de oxígeno en Anexos 1 y 2).

2.Marco teórico

La realización de ejercicio físico implica un aumento relevante de las demandas de oxígeno; sobre todo, por parte del sistema muscular. En nuestro organismo no existen grandes reservas o almacenes de oxígeno —de hecho, se estima que la cantidad de oxígeno presente a nivel muscular (unido a mioglobina) es alrededor 300 ml, lo que no alcanzaría para desarrollar una tarea específica—, por tanto, para la preservación de la vida es necesario que se mantenga en todo momento una estrecha relación entre el suministro y consumo de oxígeno. Para un adecuado suministro de oxígeno se requiere la integración de diferentes sistemas biológicos, siendo los más relevantes los sistemas respiratorio, cardiovascular, hematológico y muscular. Durante la hematosis, o intercambio de gases a nivel alveolar, el oxígeno pasa al torrente sanguíneo, en donde gran parte se une a la hemoglobina y otra muy minoritaria queda disuelta en el plasma. Desde el punto de vista de la entrega (*delivery*) de oxígeno, el que se encuentra unido a la hemoglobina es el que supone la cuantía más relevante. Así, la cantidad de oxígeno transportado dependerá del contenido de hemoglobina en la sangre, de la correcta función cardíaca (cronotropismo e inotropismo) y del grado de distensibilidad de los vasos sanguíneos (resistencia vascular periférica). Es común encontrar en la literatura que el consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) se presente como el producto entre el gasto cardíaco (que es frecuencia cardíaca x volumen expulsivo) y la diferencia arterio-venosa de oxígeno:

$$\dot{V}O_2 = FC \times V.exp \times Dif(a-v)O_2$$

Para comprender de mejor manera la influencia que tienen los principales sistemas biológicos exigidos en el esfuerzo físico sobre el consumo de oxígeno, se mencionan a continuación las principales variables que permiten una mayor $\dot{V}O_2$:

- **Sistema respiratorio:** a través de una adecuada ventilación pulmonar ($\dot{V}_E$), definida como el producto entre frecuencia respiratoria (FR) y volumen corriente (V_c); eficiencia ventilatoria, reflejada a través de una adecuada ventilación alveolar y, por tanto, eliminación de dióxido de carbono, y una adecuada difusión de gases alveolares a nivel de la barrera alveolo-capilar.
- **Sistema cardiovascular:** a través de un adecuado gasto cardiaco (GC), donde se relaciona la frecuencia cardiaca (FC) y el volumen sistólico (V_{sist}), y por tanto, características de cronotropismo, inotropismo, precarga y poscarga; y parámetros hematológicos, como concentración de hemoglobina (Hb) y hematocrito (Hcto) sanguíneo. A la vez, debe existir una correcta interrelación entre estos dos últimos sistemas, ya que se requiere una adecuada relación entre la ventilación y la perfusión ($\dot{V}/\dot{Q}$) a nivel del parénquima pulmonar.
- **Sistema muscular:** las características de las diferentes fibras musculares, y por tanto, la densidad mitocondrial, presencia y actividad de diferentes enzimas participantes en el metabolismo celular (ciclo de Krebs), y la cantidad de vasos sanguíneos (capilarización) irrigando las fibras musculares.
- **Sistema nervioso autónomo:** entre el sistema cardiovascular y muscular debe existir una adecuada relación de distribución de flujo sanguíneo, y por tanto, de respuesta de las paredes vasculares, ya que de ello va a depender el incremento del gasto cardiaco cuando se realice ejercicio a gran intensidad, siendo regulado mediante hormonas y neurotransmisores, tales como la adrenalina, noradrenalina y acetilcolina.

Ahora bien, desde el punto de vista procedimental, para medir el $\dot{V}O_2$ se requiere un sistema de calorimetría indirecta calibrado (analyzer de variables ventilatorias y gases exhalados respiración por respiración) unido a un dispositivo que entregue de manera regulada la carga de trabajo, con la finalidad de incrementar la intensidad del esfuerzo físico (ergómetro), siendo los más comunes el cicloergómetro de piernas, o bicicleta estática; cicloergómetro de brazos, cinta rodante, o *treadmill*. El avance de la tecnología ha permitido la actual portabilidad de estos instrumentos, pudiendo realizar estas mediciones fuera del ambiente controlado del laboratorio a través de diferentes pruebas de campo.

3. Evaluación directa del consumo de oxígeno máximo ($\dot{V}O_2$ máx.)

Cuando se estudia la respuesta de los parámetros fisiológicos de ejercicio en condiciones de laboratorio, normalmente se evalúan dos respuestas: una en la que la intensidad del ejercicio aumenta progresivamente hasta llegar al máximo que logra el sujeto (en el caso de querer conseguir un esfuerzo máximo), y otra en la que se mantiene una intensidad de ejercicio constante durante un tiempo determinado que, en condiciones normales, no suele ser inferior a 20 minutos ni superior los 60 minutos. Para el primer caso, se habla de ejercicio incremental, y en el segundo, de ejercicio de estado estacionario o, mejor, de carga constante.

3.1 Respuesta del $\dot{V}O_2$ en el ejercicio incremental

El $\dot{V}O_2$ presenta una relación lineal con la intensidad del ejercicio: a mayor intensidad del ejercicio, mayor será el $\dot{V}O_2$ ^{2,8}. Esta relación mantiene su linealidad durante las cargas de trabajo submáximas, pero se pierde si el sujeto es capaz de aumentar la intensidad de ejercicio una vez que ha llegado a su máximo consumo de oxígeno. En este caso, se grafica una meseta, o *plateau*, es decir, el $\dot{V}O_2$ se mantiene estable, a pesar de aumentar la intensidad de ejercicio (figura 1).

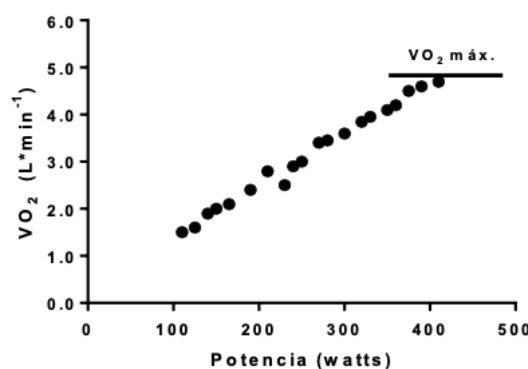


Figura 1. Relación entre el consumo de oxígeno y la carga de trabajo.

3.2 Respuesta del $\dot{V}O_2$ a un ejercicio de carga constante

El $\dot{V}O_2$ se ajusta a cada intensidad constante de ejercicio tras un período de adaptación para, posteriormente, estabilizarse^{2,5,8}. La fase de adaptación va en relación con la intensidad de trabajo requerida y de la propia cinética de consumo de oxígeno de cada sujeto.

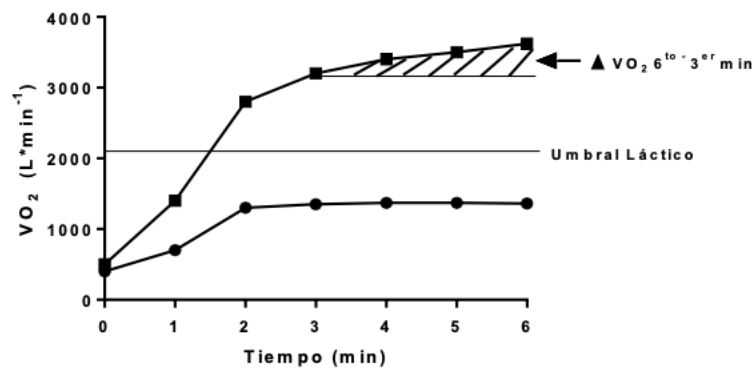


Figura 2. Consumo de oxígeno durante un ejercicio de carga constante por debajo (línea inferior) y por encima (línea superior) del umbral láctico (LT).

4. Umbral anaeróbico o umbral láctico

Con el umbral anaeróbico se mide la intensidad de ejercicio, donde el sistema anaeróbico comienza a participar de manera relevante en la producción de energía para el movimiento, es decir, la intensidad de ejercicio en donde la glucólisis anaeróbica comienza a intervenir de manera importante como proveedora de ATP^{7,9}. La definición clásica sugiere que, en un momento metabólico determinado durante un ejercicio de tipo incremental, se alcanza un estado en el que la demanda de oxígeno de los músculos metabólicamente activos es mayor que el aporte de oxígeno a la mitocondria para producir ATP por esta vía energética. Este desequilibrio provoca un aumento de la conversión anaeróbica de piruvato a lactato en el citosol de la célula.

En realidad, este es un proceso transitorio que puede analizarse con modelos bifásicos, por lo que actualmente no se suele hablar de umbral anaeróbico, sino de transición aeróbica-anaeróbica. No obstante, el concepto de umbral anaeróbico todavía es útil a nivel práctico para predecir la máxima velocidad estable de un ejercicio (carrera, natación, ciclismo, etc.) que se puede mantener por encima de los 15 minutos. Este valor de umbral se incrementa con el entrenamiento de resistencia. Si bien el $\dot{V}O_2$ máx. alcanza una mejoría con el comienzo del entrenamiento físico en sujetos sedentarios, este tiende a cambiar levemente más allá del entrenamiento continuo.

El umbral anaeróbico se ubica, por lo general, entre el 55% y 65% del $\dot{V}O_2$ máx. en sujetos sanos sedentarios o desentrenados, y entre el 70% y 85% en sujetos entrenados^{2,8,10}. La intensidad de ejercicio que se prescribe para entrenar las capacidades de resistencia es al menos de 5% por encima del umbral anaeróbico para poder, de esta manera, incrementar este umbral.

La medición de este umbral puede estar implícito en la evaluación de consumo de oxígeno máximo, es decir, es parte de los procedimientos a realizar en la evaluación de $\dot{V}O_2$ máx., y al igual que esta, el valor del umbral anaeróbico guarda relación con el sistema muscular y con el aprendizaje o experiencia previa con el ejercicio realizado, por tanto, se sugiere que siempre deba evaluarse con aquella actividad que el sujeto practique en forma regular, principalmente en sujetos desentrenados o sedentarios. Por ello, sería un error en la metodología evaluar el $\dot{V}O_2$ máx. y el umbral anaeróbico de futbolistas profesionales utilizando bicicletas estáticas; en este caso, lo recomendable sería utilizar cinta rodante.

La medida más reproducible del umbral anaeróbico es mediante la determinación de la concentración del lactato en sangre, ya que es la evaluación más indicativa del estrés metabólico de la carga de ejercicio y está relacionado con la velocidad de la carrera. El lactato es un producto del catabolismo anaeróbico del glucógeno muscular y su medición en la sangre es un reflejo de que el músculo ha comenzado a producir energía por fuentes anaeróbicas^{2, 5, 6}.

Es común encontrar artículos que se refieren al umbral de lactato, como:

- **OBLA** (*Onset of Blood Lactate Accumulation*): situado arbitrariamente a un valor de 4 mM¹¹.
- **Umbral aeróbico**: situado en el punto donde la concentración de lactato en sangre comienza a subir exponencialmente (LT: *lactate threshold*).
- **Umbral anaeróbico**: situado 1 mM por encima de la línea basal antes del crecimiento exponencial en su concentración (LT + 1 mM)⁷.

Debido a que el lactato que se produce en el músculo debe llegar a la sangre para su registro, se recomienda utilizar una prueba incremental en el que los estadíos a cada intensidad sean los suficientemente largos como para conseguir un equilibrio entre el lactato en músculo y en sangre; idealmente, 3 a 5 minutos.

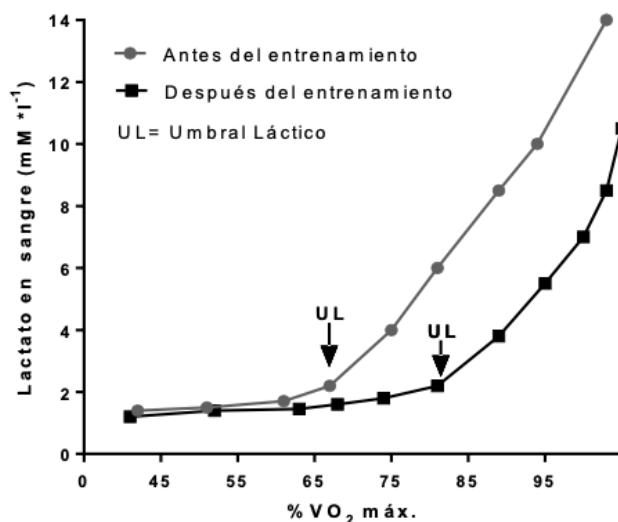


Figura 3. Efectos del entrenamiento de resistencia física en la respuesta de ácido láctico (lactato) sanguíneo en el ejercicio incremental.

5. Medición de umbral de lactato en sangre

Para hallar el umbral de lactato, se debe graficar la concentración de lactato en el eje Y, o de las ordenadas, en función al aumento en $\dot{V}O_2$ o de carga de trabajo en el eje X, o de las abscisas. Se debe definir una línea basal y una línea exponencial que unirá los puntos por encima de esa línea basal. La carga que provoca el umbral anaeróbico estará situada un milimol (1 mM) por encima del punto de cruce entre la línea basal y la exponencial. El punto de ruptura se denomina umbral aeróbico.

El sujeto debe realizar un calentamiento inicial durante 5 a 10 minutos a una carga suave antes de comenzar la prueba, ya que de esa manera se asegura que el lactato inicial no se encuentre demasiado alto (1.5 a 3 mM). En personas muy entrenadas, la línea base es casi paralela al eje de las X. Sin embargo, en personas desentrenadas la línea basal muestra una tendencia de inclinación hacia arriba. Por este motivo, es recomendable realizar tres o cuatro cargas de ejercicio por debajo del umbral y otras dos o tres por encima de este, y así asegurarse de que se identificó el punto de incremento exponencial.

El $\dot{V}O_2$ en el punto de $LT + 1 \text{ mM}$ es la variable que mejor predice el rendimiento en pruebas de carrera de fondo o ciclistas.

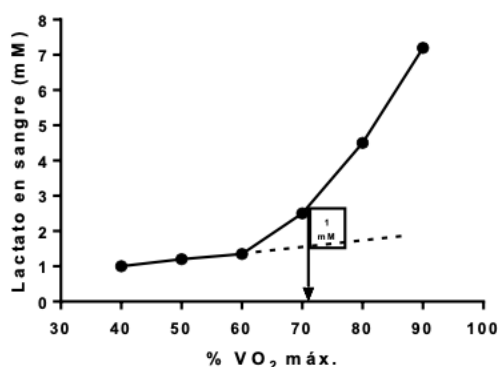


Figura 4. Ejemplo de la determinación del umbral de lactato usando el método de $LT + 1 \text{ mM}$.

6. Umbral ventilatorio

Otra forma de determinar el umbral anaeróbico es detectando en el registro de análisis de gases espirados un incremento rápido en el cociente respiratorio ($\dot{V}CO_2 / \dot{V}O_2$). Se observó que este punto se relacionaba con un incremento desproporcionado de la ventilación minuto ($\dot{V}E$) al mismo tiempo que se denota el aumento en el lactato sanguíneo. Algunos investigadores (Wasserman, K, *et al.* 1973) sostienen que el mecanismo subyacente que produce la respuesta simultánea de elevación del ácido láctico y la ventilación minuto es producto de la mayor liberación de protones (H^+) que sobrepasa la capacidad de amortiguación por parte del bicarbonato de la sangre (HCO_3^-), con la consecuente mayor producción de dióxido de carbono (CO_2) y, por ende, mayor estímulo sobre los quimiorreceptores ventilatorios.

Este mecanismo produce un aumento en la ventilación minuto con el propósito de librarse del exceso de CO_2 y, de esta manera, compensar la acidosis metabólica. La medida del umbral ventilatorio no requiere de ninguna prueba invasiva. Sin embargo, se necesita un equipo de ergoespirometría que registre rápidamente la ventilación pulmonar y la concentración de CO_2 en gases espirados respiración a respiración (*breath by breath*).

6.1 Medición del umbral ventilatorio en gases espirados

Para conocer el umbral ventilatorio se determina el incremento exponencial de $\dot{V}CO_2$ en función del incremento en $\dot{V}O_2$ (método denominado “*V slope*”)⁹, para lo cual se identifica el punto donde se intersectan las dos rectas, la de $\dot{V}CO_2$ y la de $\dot{V}O_2$.

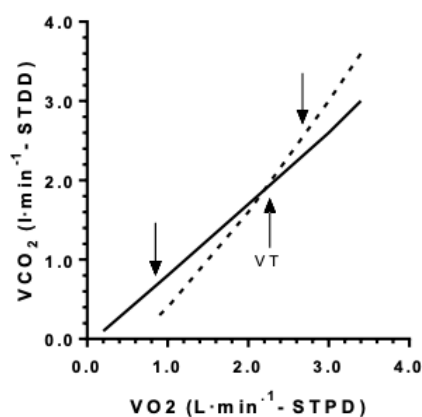


Figura 5. Determinación del umbral ventilatorio (VT) usando el método de “V slope”.

Otro método para determinar el umbral ventilatorio es mediante el registro de los equivalentes ventilatorios ($\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ y $\dot{V}E/\dot{V}O_2$), con los cuales se pueden detectar, mediante una prueba incremental, los siguientes umbrales^{2, 3, 10}:

- **Umbral aeróbico ventilatorio (VT_1)**, el cual es la carga de trabajo en la que se produce un crecimiento repentino en el $\dot{V}E/\dot{V}O_2$, sin aumento en el $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ a medida que se incrementa la carga de trabajo.
- **Umbral anaeróbico ventilatorio (VT_2)**, el cual es la carga de trabajo en la que se produce un aumento del $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ y una bajada en la presión parcial de CO_2 al final de la respiración ($P_{ET} CO_2$). La zona entre VT_1 y VT_2 se denomina zona de amortiguación isocápnica.

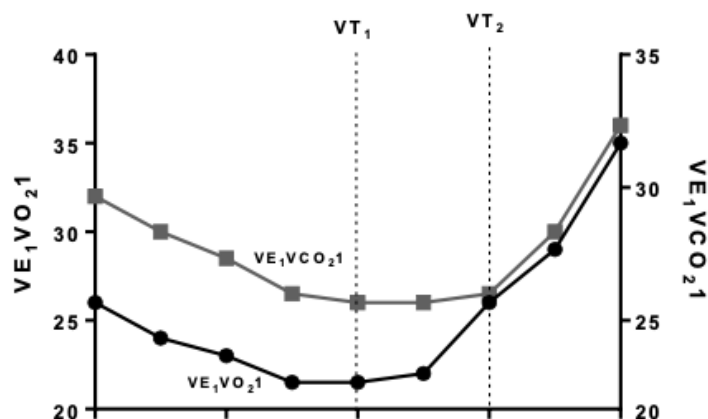


Figura 6. Ejemplo de cálculo del umbral ventilatorio utilizando los equivalentes ventilatorios.

La medición del umbral anaeróbico utilizando lactato o equivalentes ventilatorios debe conllevar a resultados similares. La siguiente tabla ilustra las relaciones entre umbrales ventilatorios y lactato:

	Utilizando lactato	Utilizando ventilación
Umbral aeróbico	LT	VT_1
Umbral anaeróbico	LT + 1 mM	VT_2
		V_{slope}

A continuación, se muestra el comportamiento de $\dot{V}O_2$ y de $\dot{V}CO_2$ típico con respecto al tiempo.

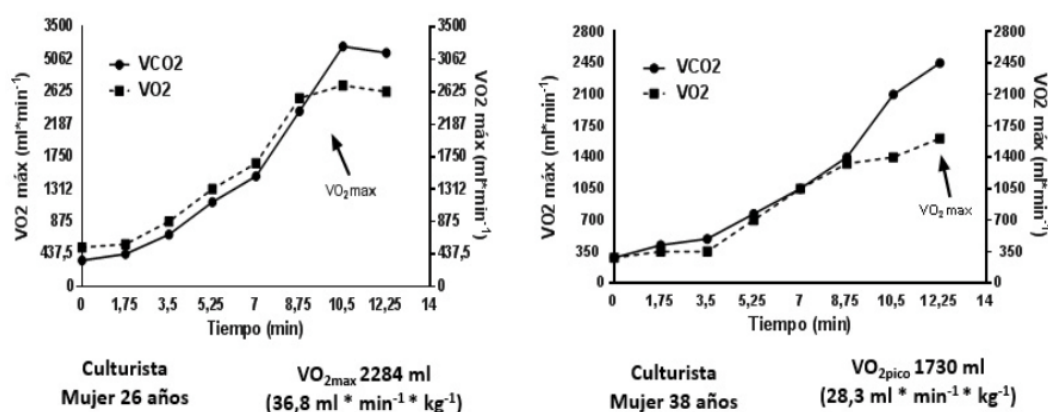


Figura 7. A la izquierda se muestra una curva representativa de consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) y producción de dióxido de carbono ($\dot{V}CO_2$) con respecto al tiempo. Obsérvese el paralelismo inicial entre ambas curvas hasta que a partir del umbral anaeróbico aumenta desproporcionadamente la $\dot{V}CO_2$. La curva de $\dot{V}O_2$ aumenta linealmente, hasta producir un aspecto de meseta al final del ejercicio ($\dot{V}O_2$ máx.). La parte descendente tras la meseta corresponde al inicio de la recuperación. A la derecha se muestra una curva representativa de $\dot{V}O_2$ y $\dot{V}CO_2$, con respecto al tiempo de un caso en que el ascenso de $\dot{V}O_2$ se interrumpe sin llegar a mostrar forma de meseta, lo que se conoce como $\dot{V}O_2$ pico.

Referencias

1. DeCato T, Haverkamp H, Hegewald M, Sockrider M, Kaminsky D. Cardiopulmonary Exercise Testing (CPET). Am J Respir Crit Care Med [Internet]. 2020 Jan 1 [cited 2021 Mar 12];201:01–2. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31891317/>
2. Guazzi M, Bandera F, Ozemek C, Systrom D, Arena R. Cardiopulmonary exercise testing: what is its value? J Am Coll Cardiol [Internet]. 2017 Sep 26 [cited 2021 Mar 12];70:1618–36. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28935040/>
3. Poole D, Jones A. Measurement of the maximum oxygen uptake $\text{VO}_{2\text{max}}$: $\text{VO}_{2\text{peak}}$ is no longer acceptable. J Appl Physiol [Internet]. 2017 [cited 2021 Mar 12];122:997–1002. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28153947/>
4. Moreira Nunes R, De Souza Vale R, Simão R, De Salles B, Reis V, Da Silva Novaes J, et al. Prediction of $\text{VO}_{2\text{max}}$ during cycle ergometry based on submaximal ventilatory indicators. J Strength Cond Res [Internet]. 2009 Sep [cited 2021 Mar 12];23:1745–51. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19675488/>
5. Sutton J. Limitations to maximal oxygen uptake. Sport Med An Int J Appl Med Sci Sport Exerc [Internet]. 1992 [cited 2021 Mar 12];13:127–33. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1561507/>
6. Bassett D, Howley E. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. Med Sci Sports Exerc [Internet]. 2000 [cited 2021 Mar 12];32:70–84. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10647532/>

7. Hagberg J, Coyle E. Physiological determinants of endurance performance as studied in competitive racewalkers. *Med Sci Sports Exerc* [Internet]. 1983 [cited 2021 Mar 12];15:287–9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6621317/>
8. Solberg G, Robstad B, Skjønberg O, Borchsenius F. Respiratory gas exchange indices for estimating the anaerobic threshold. *J Sport Sci Med* [Internet]. 2005 [cited 2021 Mar 12];4:29–36. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24431958/>
9. Beaver W, Wasserman K, Whipp B. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol* [Internet]. 1986 [cited 2021 Mar 12];60:2020–7. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3087938/>
10. Schaun G. The maximal oxygen uptake verification phase: a light at the end of the tunnel? *Sport Med - Open* [Internet]. 2017 Dec 1 [cited 2021 Mar 12];3:01–15. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29218470/>
11. Sjodin B, Jacobs I. Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med* [Internet]. 1981 [cited 2021 Mar 12];02:23–6. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7333732/>

GUÍA DE TRABAJO

Evaluación directa de consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$). Prueba incremental continua de $\dot{V}O_2$ máx.

a) Actividad:

En esta prueba, el voluntario deberá pedalear contra cargas cada vez más intensas y sin descanso hasta el límite de la tolerancia (fatiga). En cada etapa, de 7 a 12 que tiene la prueba, se medirá la frecuencia cardiaca y el consumo de oxígeno. Para considerar que la medición de $\dot{V}O_2$ fue máxima, se debe cumplir el requisito de que, a pesar de incrementar la intensidad del ejercicio, el $\dot{V}O_2$ no sube (el sistema cardiopulmonar ha alcanzado la máxima capacidad para ofrecer oxígeno a los músculos, o de estos para consumirlo). Si esta condición no se da, entonces no se puede asegurar que el $\dot{V}O_2$ obtenido haya sido máximo.

En sujetos no entrenados es común que no se alcance ese requisito. Para verificar, a pesar de que no se cumpla este requisito, que el $\dot{V}O_2$ medido fue máximo, se deben cumplir todas estas condiciones:

- Puntuación en escala de percepción de esfuerzo de Borg mayor a 17 (Anexo 3).
- Cociente respiratorio (CR) mayor a 1.0.
- Frecuencia cardiaca menor a 5% de la predicha por edad ($220 - \text{edad}$) [Anexo 4].
- Alta concentración de lactato (8-10 mM).

Si alguna de estas condiciones no se cumple, se califica el $\dot{V}O_2$ como valor pico, no máximo.

b) Instrucciones:

- El voluntario debe ser una persona sana y con una condición física que permita la realización de esfuerzos físicos intensos.
- El participante lee, comprende el contenido y firma el consentimiento informado (Anexo 5).
- La altura del sillín (altura de trocánter mayor del fémur del sujeto) y manilla son cómodas para el voluntario, con el objetivo que quede con una semiflexión de rodillas, entre 15 a 20 grados respecto del pedal al momento de extender la rodilla.
- Asegurarse de que el sistema de ergoespirometría esté calibrado y que los datos del voluntario (nombre, edad, peso y talla) estén ingresados en el computador.
- Asegurarse de obtener un correcto registro de la presión arterial, saturación de pulso y frecuencia cardíaca (monitor portátil de FC y/o electrocardiograma), con al menos 10 minutos de reposo previo a la tomada de estos valores.
- Colocar la boquilla del ergoespirómetro en el voluntario, favoreciendo un cierre hermético y procurar que el sujeto no hable durante la prueba.
- Acordar señas para comunicarse.
- Comenzar a pedalear con una carga que provoque pulsaciones de alrededor de 130 lpm.
- A partir de este estadio, incrementar la carga cada minuto hasta que el participante no pueda mantener el ritmo de pedaleo (bajada de más de 20 rpm).
- Medir durante el desarrollo de la prueba (cada 1 minuto) el lactato sanguíneo.

- El *software* del ergoespirómetro entregará los valores de $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}O_2$, entre otros, cada 30 segundos (puede ser ajustado el tiempo de tomada). Usted registre el valor de frecuencia cardiaca y la escala de Borg, cada 30 segundos (puede ser ajustado el tiempo de tomada).
- Cuando el voluntario llegue al límite, reducir rápidamente la carga y realizar la recuperación activa.
- Transcurrido un minuto de la recuperación activa, obtener una muestra sanguínea puncionando la piel del dedo.
- Analizar el lactato.
- Limpiar y desinfectar el sitio de punción.

Umbral láctico y evaluación directa de consumo máximo de oxígeno

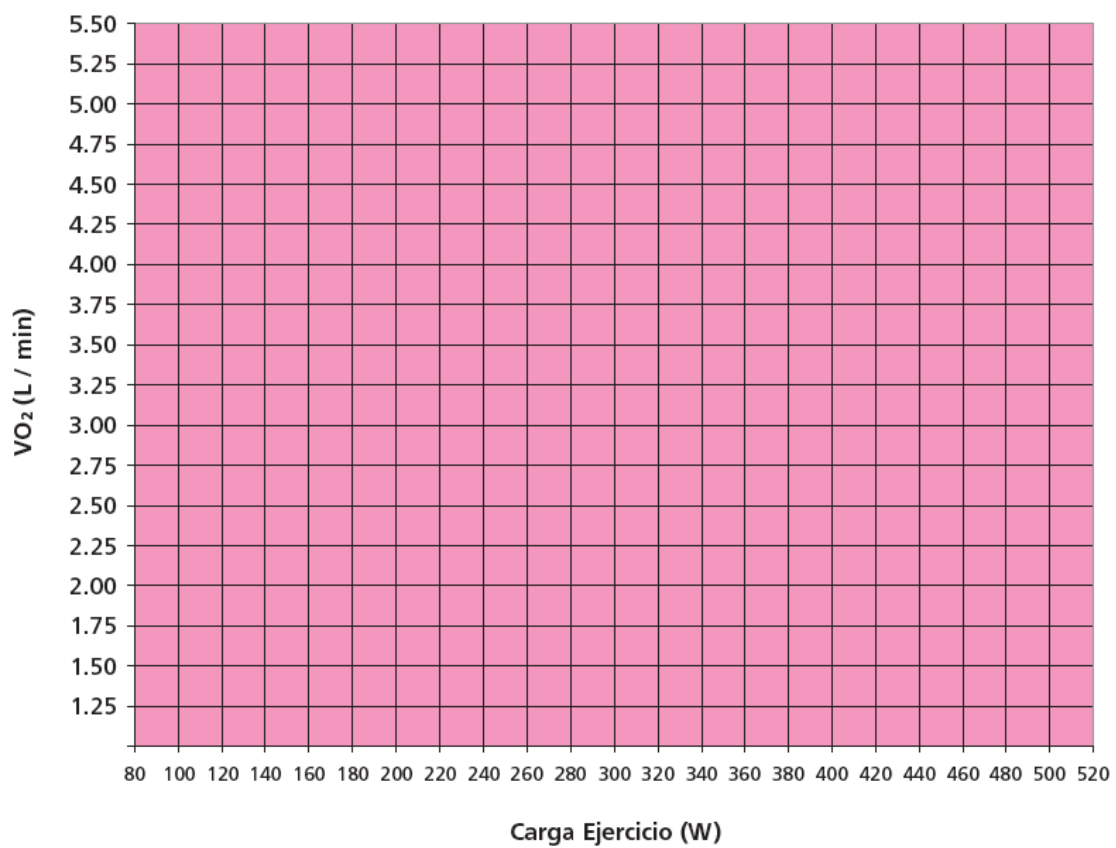
Nombre: _____

Género: (M)____ Edad (años): ____ Estatura (cm):____Peso (kg):____
(F)____

Responda las siguientes preguntas:

1. ¿Cumple el test con los requisitos necesarios para clasificarlo como máximo?
2. ¿En qué punto de la carga de trabajo se encuentra el umbral ventilatorio?
3. ¿En qué valor de consumo de oxígeno se encuentra el umbral láctico?
4. ¿En qué punto de carga de trabajo se encuentra el umbral aeróbico o VT_1 ?
5. ¿En qué punto de carga de trabajo se encuentra el umbral anaeróbico o VT_2 ?

Gráfico 2:



ANEXOS

Anexo 1

Valores de referencia de consumo de oxígeno máximo ($\dot{V}O_2$ máx.)

Tabla de referencia de $\dot{V}O_2$ máx. del *Canadian Standardized test of fitness* (CSTF; 1986)

POTENCIA AERÓBICA MÁXIMA ($\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)						
Hombres	Años					
Percentil	15-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69
95	62	59	51	44	40	32
90	61	58	50	43	39	31
85	60	57	48	42	38	30
80	59	59	47	42	38	30
75	59	55	47	41	37	29
70	58	54	46	40	36	29
65	58	52	46	40	36	29
60	57	48	45	39	35	28
55	57	44	44	38	35	28
50	56	43	43	38	34	28
45	54	43	42	37	34	27
40	52	42	41	37	33	27
35	47	42	40	36	33	27
30	46	41	39	35	32	27
25	44	40	38	34	31	26
20	43	40	37	32	28	26
15	42	39	36	31	26	25
10	41	38	34	30	25	24
5	40	37	33	29	24	23

Anexo 2

Valores de referencia de consumo de oxígeno máximo ($\dot{V}O_2$ máx.)

Tabla de referencia de $\dot{V}O_2$ máx. estadounidense

(*Institute for Aerobics Research* [Dallas, TX; 1994]).

POTENCIA AERÓBICA MÁXIMA (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)					
Hombres	Edad				
Percentil	20-29	30-39	40-49	50-59	60+
90	51.4	50.4	48.2	45.3	42.5
80	48.2	46.8	44.1	41.0	38.1
70	46.8	44.6	41.8	38.5	35.3
60	44.2	42.4	39.9	36.7	33.6
50	42.5	41.0	38.1	35.2	31.8
40	41.0	38.9	36.7	33.8	30.2
30	39.5	37.4	35.1	32.3	28.7
20	37.1	35.4	33.0	30.2	26.5
10	34.5	32.5	30.9	28.0	23.1

POTENCIA AERÓBICA MÁXIMA (mL·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)					
Mujeres	Edad				
Percentil	20-29	30-39	40-49	50-59	60+
90	44.2	41.0	39.5	35.2	35.2
80	41.0	38.6	36.3	32.3	31.2
70	38.1	36.7	33.8	30.9	29.4
60	36.7	34.6	32.3	29.4	27.2
50	35.2	33.8	30.9	28.2	25.8
40	33.8	32.3	29.5	26.9	24.5
30	32.3	30.5	28.3	25.5	23.8
20	30.6	28.7	26.5	24.3	22.8
10	28.4	26.5	25.1	22.3	20.8

Anexo 3

Escala de esfuerzo percibido de Borg.

Puntuación	Sensación
6	Muy, muy suave
7	
8	
9	Muy suave
10	
11	Bastante suave
12	
13	Algo duro
14	
15	Duro
16	
17	Muy duro
18	
19	Muy, muy duro
20	

Anexo 4

Cálculo de la frecuencia cardiaca máxima (FC máx.).

Ecuación de Karvonen: $FC \text{ máx.} = 220 - (\text{edad} \cdot [\text{años}])$.

Karvonen M, Kentala E, Mustala O

The effect of training on heart rate. A longitudinal study.

Ann Med Exp Biol Fenn. 1957; 35:307-315.

Ecuación de Tanaka: $FC \text{ máx.} = 208 - (0.7 \cdot [\text{años}])$.

Tanaka H, Monahan KD, Seals DR

Age-Predicted Maximal Heart Rate.

J. Am. Coll. Cardiol., 37, 1, 2001.

Ecuaciones de Whaley

Hombre: FC máx. = $204 - (0.812 \cdot \text{edad}) + (0.276 \cdot (\text{FC reposo})) - (0.084 \cdot (\text{peso corporal})) - (4.5 \cdot (\text{código de fumar}))$.

Mujer: FC máx. = $205 - (0.718 \cdot \text{edad}) + (0.162 \cdot (\text{FC reposo})) - (0.105 \cdot (\text{peso corporal})) - 6.2 \cdot (\text{código de fumar})$.

Código de fumar: 1 = si fuma; 0 = no fuma o dejó de fumar.

Whaley M, Kaminsky L, Dwyer G, Getchell L, Norton J

Predictors of over-and underachievement of age-predicted maximal heart rate.

Med Sci Sport. Exerc, 24(10), 1173–1179, 1992.

Ecuación de la FC de reserva (FCres.): $\text{FCres.} = ((\text{FC máxima} - \text{FC reposo}) \% \text{ deseado} + (\text{FC reposo}))$

Karvonen M, Kentala E, Mustala O

The effect of training on heart rate. A longitudinal study.

Ann Med Exp Biol Fenn. 1957; 35:307-315.

Anexo 5

Consentimiento informado para prueba de esfuerzo

Usted va a realizar una prueba de ejercicios sobre un ergómetro (cicloergómetro o tapiz rodante). En un comienzo, la intensidad será baja y se aumentará la carga en períodos de tiempo iguales, hasta que se obtenga su máximo esfuerzo. Durante la prueba se le solicitará que respire a través de una boquilla para analizar su consumo de oxígeno. Este procedimiento no le impedirá respirar normalmente el aire de la sala. Durante los estadíos de la prueba se le extraerá una pequeña muestra de sangre por medio de una punción en el pulpejo del dedo o en el lóbulo de la oreja, para el análisis del ácido láctico. Durante estas extracciones se seguirán procedimientos higiénicos con la mayor asepsia posible, para evitar la infección de las heridas producidas en la piel. Además, se le monitorizará la frecuencia cardíaca y la presión arterial con material adherido a su pecho o fijado con una banda elástica.

Si se observase cualquier signo anormal de fatiga, cambios repentinos en su frecuencia cardíaca, presión sanguínea, o si usted experimentase síntomas como mareos o descoordinación, se interrumpirá la prueba. Es importante que sepa que puede suspender la prueba, si lo desea, por sentir fatiga u otras molestias que no fuesen obvias para nosotros.

Existe la posibilidad de que ocurran anomalías en la presión arterial, o alteraciones en el ritmo cardíaco. Todos nuestros esfuerzos se encaminarán a minimizar estos riesgos y se mantendrá una observación cuidadosa durante la prueba. En caso de que se produjera una situación de emergencia, se le trasladaría con la mayor celeridad al servicio de urgencia más cercano.

La información que usted nos oculte o desvirtúe acerca de síntomas anteriores relacionados con su sistema cardiorrespiratorio en situaciones de esfuerzo físico, puede aumentar el posible riesgo para su salud en esta prueba de esfuerzo. Usted deberá informarnos si padece alguna anomalía o enfermedad del sistema cardiorrespiratorio, endocrino-metabólico o músculo-esquelético.

La información acerca de cualquiera de los siguientes síntomas durante la práctica del ejercicio es de vital importancia, y debería comunicárnoslo de inmediato:

- Dificultad respiratoria con bajo nivel de actividad física.
- Dolor o sensación de opresión en el pecho, cuello, mandíbula, espalda o brazos.
- Taquicardias, arritmias o historial familiar de muerte súbita.

Igualmente, debe comunicarnos cuáles son los medicamentos que esté tomando en los últimos días y, especialmente, los ingeridos el mismo día de la prueba. Los beneficios que usted podrá obtener con los resultados de esta prueba son el de conocer sus capacidades físicas y su rendimiento deportivo, o el diagnóstico de alguna enfermedad cardiovascular.

Cualquier pregunta o duda que tenga acerca de la prueba, por favor, debe hacérsela saber y se la resolveremos. La información fruto de esta prueba de esfuerzo será confidencial y no será revelada a ninguna persona, excepto a su médico y/o entrenador, si usted lo desea. Sin embargo, esta información puede ser usada para análisis estadísticos y propósitos científicos, conservando siempre su anonimato.

ACEPTO voluntariamente realizar la prueba de esfuerzo para determinar el nivel de capacidad física, rendimiento deportivo o el estado de salud cardiovascular. Entiendo que puedo suspender la prueba en cualquier momento si así lo decidiese. Se me ha ofrecido una copia de esta hoja para quedármela si lo deseo.

He leído y entendido los procedimientos de la prueba de esfuerzo y el riesgo que puede conllevar la misma y he recibido una respuesta satisfactoria a mis preguntas acerca de la misma.

Nombres y apellidos:_____

Fecha:_____Firma:_____



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE

CAPÍTULO 8

MÉTODOS DE VALORACIÓN INDIRECTA DE LA CAPACIDAD AERÓBICA MÁXIMA

AUTORES

Felipe A. Contreras Briceño

Maximiliano Espinosa Ramírez

RESUMEN

La valoración de la capacidad aeróbica debe ser siempre realizada antes del inicio de un programa de entrenamiento físico. En los atletas, es idóneo (siempre que exista la posibilidad) realizar evaluaciones máximas mediante ergoespirometría con análisis de gases exhalados, pues es el criterio *gold standard*, mientras que en pacientes y/o sujetos no habituados al desarrollo de ejercicio, es más seguro realizar valoraciones submáximas, ya que permiten una estimación indirecta de la máxima capacidad de rendimiento físico. En este capítulo, se describen las pruebas o *test* de mayor uso en la práctica profesional para evaluar el consumo de oxígeno en forma indirecta; reconociendo que pueden existir otros métodos con mayor uso en ciertos contextos clínicos que no están incluidos en este capítulo. Una vez revisado este capítulo y las orientaciones contenidas en las pruebas físicas descritas, el lector reconocerá los criterios comunes a considerar para realizar las evaluaciones bajo ambiente seguro.

1. Introducción

La medición directa de la capacidad aeróbica máxima o consumo de oxígeno es un procedimiento complejo y de alto costo; sin embargo, en la actualidad existen varias pruebas o *test* físicos que de manera indirecta estiman esa cualidad. En la primera parte de este capítulo se describen dos de las pruebas de estimación de consumo máximo de oxígeno; en ambas se utiliza un cicloergómetro o bicicleta estática y no se requiere que el individuo realice un esfuerzo máximo, por lo que puede realizarse perfectamente por individuos sedentarios. Posteriormente, se describen pruebas indirectas maximales y submaximales sin la necesidad de un cicloergómetro o bicicleta estática, las que idealmente deben ser realizadas por sujetos activos físicamente, para así evitar lesiones asociadas a la práctica deportiva.

2. Test de Åstrand y Ryhming

Esta prueba o *test* estima el consumo máximo de oxígeno ($\dot{V}O_2$) de una persona a partir de la medición de su frecuencia cardiaca durante un esfuerzo submáximo. Considerando las diferencias de frecuencia cardiaca que los individuos sometidos a pruebas de esfuerzo físico puedan manifestar, es que los investigadores Åstrand y Ryhming desarrollaron un nomograma para estimar el $\dot{V}O_2$ máx., dependiendo del valor de frecuencia cardiaca provocada por una carga determinada en el cicloergómetro¹.

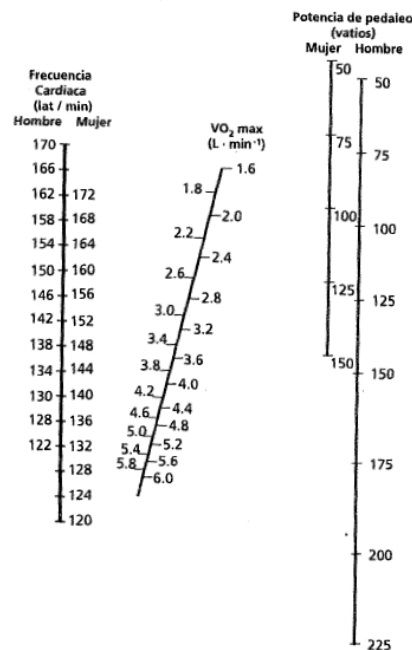


Figura 1. Nomograma de Åstrand y Ryhming modificado, para calcular $\dot{V}O_2$ máx.

Los valores de frecuencia cardiaca máxima y submáxima se reducen con la edad, y, por tanto, los valores obtenidos en el nomograma estarían sobreestimando el $\dot{V}O_2$ máx. a medida que el sujeto envejece, es decir, entregándoles un resultado de $\dot{V}O_2$ máx. mayor que el que realmente tienen. Por tal motivo, los autores del *test* desarrollaron un ajuste según la edad del participante (Åstrand, 1960), y se debe multiplicar el resultado de $\dot{V}O_2$ máx. por el factor de ajuste de edad.

Tabla 1. Factor de corrección según edad en *test* de Åstrand y Ryhming.

EDAD	FACTOR
0-15	1.1
15-25	1.0
25-35	0.87
35-40	0.83
40-45	0.78
45-50	0.75
50-55	0.71
55-60	0.68
60-65	0.65

3. Test de Cooper

En 1963, el fisiólogo Bruno Balke desarrolló una prueba de campo de 15 minutos de carrera continua para estimar el rendimiento físico de militares de Estados Unidos. El investigador Kenneth H. Cooper acortó en 1968 la prueba a 12 minutos. La correlación del *test* de Cooper en sujetos adultos (17 a 52 años) respecto de la evaluación directa de $\dot{V}O_2$ máx. es de $r = 0.897$; mientras que en población infantil (11 a 14 años) es de $r = 0.650$. En resumen, el *test* de Cooper estima el $\dot{V}O_2$ máx. con un error cercano al 20%².

Ecuación de estimación de $\dot{V}O_2$ máx. según *test* de Cooper:

$$\dot{V}O_2 \text{ máx. (ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}) = 33.3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1} + (0.178 \cdot (\text{ritmo (m}\cdot\text{min}^{-1}) - 150 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}))$$

Para obtener el ritmo promedio en los 12 minutos de carrera, se suman las vueltas (400 m) y la fracción de vuelta recorrida expresada en metros y se divide en 12 minutos.

4. Test de Course-Navette (test de Léger-Lambert)

El test de Course-Navette es una prueba de evaluación cardiorrespiratoria creada por el Dr. Luc Léger en la que estima el $\dot{V}O_2$ considerando la velocidad de carrera que el sujeto alcanzó al final de su desarrollo en el test. Esta prueba consiste en recorrer la distancia de 20 m, de un punto a otro, ininterrumpidamente, y realizando un cambio de sentido al ritmo indicado por una señal de audio que tiene un periodo de aparición cada vez más corto de tiempo. El sujeto debe desplazarse hasta la línea separada por 20 m, debe pisarla y cruzarla hasta que la siguiente señal de audio le indique que tiene que volver al otro lado. Como se mencionó, la señal de audio va a un ritmo que aumenta progresivamente el ritmo de carrera. Cada periodo rítmico tiene una duración de 1 minuto. El momento en que el sujeto interrumpe la prueba es el que indica la mayor resistencia cardiorrespiratoria^{3, 4}. El $\dot{V}O_2$ máximo se calcula a partir de la velocidad de carrera que alcanzó el sujeto en el último periodo que pudo resistir, según la siguiente ecuación:

Ecuación de estimación de $\dot{V}O_2$ máx. según test de Course-Navette.

$$\dot{V}O_2 \text{ máximo} = 5.857 \cdot \text{Velocidad (km} \cdot \text{hr}^{-1}) - 19.458$$

5. Test de George

El test de George consiste en realizar una carrera continua de 2 400 m (seis vueltas a la pista de atletismo [400 m]). La prueba es suficientemente larga como para provocar un esfuerzo aeróbico máximo y es fácil de utilizar en un grupo de varios sujetos⁵.

Los investigadores proponen la siguiente fórmula para la población adulta:

$$\dot{V}O_2 \text{ máx. (ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) = 88.02 + (3.716 \cdot \text{género}) - (0.1656 \cdot \text{peso (kg)}) - (2.767 \cdot \text{tiempo (min)})$$

Sexo masculino: género = 1

Sexo femenino: género = 0

6. Test de Margaria

Existe una estimación de $\dot{V}O_2$ máx. basada en el mejor tiempo obtenido en una prueba de carrera entre 1 000 y 11 000 m a elegir. A continuación, se presenta la ecuación de estimación de $\dot{V}O_2$ máx. propuesta por Margaria⁶:

$$\dot{V}O_2 \text{ máx. (ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) = (\text{Distancia (m)} + (30 \cdot \text{tiempo (min)})) / (5 \cdot (1 + \text{tiempo (min)}))$$

7. Test de yo-yo intermitente

Este *test* ha sido desarrollado recientemente por el fisiólogo danés Jeens Bangsbo. Está inspirado en el *test* de Course-Navette. Esta prueba consiste en carreras de ida y vuelta a una distancia de 20 m delimitada por dos conos. La velocidad de cada una de las series se aumenta según la señal de un silbato o una grabación. Entre cada serie de 40 m, el participante tiene 10 segundos de recuperación activa (trotando). La recuperación se estandariza poniendo un cono a 5 m del cono de salida⁷.

Cuando el participante no llega a cubrir por dos veces la distancia en el tiempo establecido, el *test* finaliza y el resultado son los metros cubiertos. La duración total de la prueba oscila entre 6 y 20 minutos. La correlación de este *test* y la medición directa de $\dot{V}O_2$ máx. es de $r = 0.71$.

Ecuación para estimación del $\dot{V}O_2$ máx. según yo-yo *test*:

$$\dot{V}O_2 \text{ máx. (ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}) = 24.8 + (0.014 \cdot \text{metros recorridos})$$

8. Test de escalón de Åstrand

Este *test* es recomendable utilizarlo en poblaciones en las que se espera un $\dot{V}O_2$ máx. no muy alto, ya que su duración es de solo 5 minutos. La estimación se basa en la frecuencia cardiaca de recuperación, medida por palpación, durante 15 segundos, entre el segundo 15 y el 30, tras haber finalizado el *test*. Las características del *test* se resumen a continuación^{1,8}:

Duración: 5 minutos

Cadencia: 22.5 subidas por minuto

Altura del escalón: 33 cm para mujeres y 40 cm para hombres

Las pulsaciones obtenidas durante los 15 segundos (entre 15 y 30 segundos después de finalizado el entrenamiento) de recuperación se multiplican por 4 para hallar las pulsaciones por minuto. Dependiendo del peso del sujeto evaluado y del género, se utilizan las siguientes fórmulas:

Ecuación para estimar el $\dot{V}O_2$ máx. según la prueba de escalón de Åstrand.

Hombres:

$$\dot{V}O_2 \text{ máx. (L} \cdot \text{min}^{-1}) = 3.744 \cdot ((\text{peso (kg)} + 5) / (\text{FC} - 62))$$

Mujeres:

$$\dot{V}O_2 \text{ máx. (L} \cdot \text{min}^{-1}) = 3.750 \cdot ((\text{peso (kg)} - 3) / (\text{FC} - 65))$$

En sujetos por sobre los 25 años, esta prueba sobreestima el $\dot{V}O_2$. Por tal motivo, en ese grupo etario se aplica el factor de corrección siguiente:

Tabla 2. Factor de corrección por edad en sujetos mayores a 25 años.

Edad	Factor
35	0.87
40	0.83
45	0.78
50	0.75
55	0.71
60	0.68
65	0.65

9. Test de escalón de Bruce

El protocolo de Bruce es un *test* orientado al estudio de personas con capacidad física promedio normal o medianamente disminuida⁹. Consiste en incrementos cada tres minutos en la velocidad e inclinación de la cinta rodante, o *treadmill*, como se observa en la tabla:

Etapas	Duración	Velocidad (mph – km · h ⁻¹)	Inclinación	METS
I	3 minutos	1.7 – 2.7	10%	4.8
II	3 minutos	2.5 – 4.0	12%	6.8
III	3 minutos	3.4 – 5.4	14%	9.6
IV	3 minutos	4.2 – 6.7	16%	13.2
V	3 minutos	5.0 – 8.0	18%	16.1

10. Test de PWC 170 (*Physical Work Capacity*)

Cuando el fisiólogo H. Wahlund ideó este protocolo en 1948, estableció que 170 latidos por minuto (lpm) de frecuencia cardíaca (FC) era el valor óptimo para desarrollar un trabajo de manera adecuada¹⁰. Se infiere de esto que, a mayor edad del sujeto evaluado, menor será el valor de FC que se desea obtener (p. ej.: PWC 150; PWC 130).

Esta prueba se realiza en un cicloergómetro de la siguiente manera:

- Calentamiento inicial de 2 a 5 minutos a 25 vatios (pedaleo).
- En sujetos sedentarios (no entrenados), carga inicial 50 vatios y aumento cada 2 minutos de 25 vatios.
- En deportistas, carga inicial de 50 vatios e incremento de 50 vatios cada 2 minutos.

- En deportistas de alto rendimiento, carga inicial de 100 vatios y aumentos de 50 vatios cada 2 minutos.
- La recuperación debe ser activa, es decir, con una intensidad del 50 % de la carga máxima alcanzada durante 5 minutos.

(Siempre se debe controlar la presión arterial al minuto 1, 3 y 5 de la recuperación.)

Valoración:

$$\text{PWC: } W_1 + ((P - P_1) / (P_2 - P_1) \cdot 4) \cdot 100$$

W_1 : vatios (carga física) a los que se alcanza el P_1 .

P : Frecuencia cardiaca objetivo (pretendida) [170 lpm].

P_1 : Frecuencia cardiaca registrada en el escalón inmediatamente inferior a 170 lpm.

P_2 : Frecuencia cardiaca máxima alcanzada.

Tabla 4. Valores obtenidos en $\dot{V}O_2$ máx. utilizando el test PWC 170.

Edad	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto	Muy alto
Mujeres:					
<29	< 24	24-30	31-37	38-48	>48
30-39	< 20	20-27	28-33	34-44	>44
40-49	< 17	17-23	24-30	31-41	>41
50-59	< 15	15-20	21-27	28-37	>37
60-69	< 13	13-17	18-23	24-34	>34
Hombres:					
<29	< 25	25-33	34-42	43-52	>52
30-39	< 23	23-30	31-38	39-48	>48
40-49	< 20	20-26	27-35	36-44	>44
50-59	< 18	18-24	25-33	34-42	>42
60-69	< 16	16-22	23-30	31-40	>40

Referencias

1. Astrand P, Ryhming I. A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. *J Appl Physiol* [Internet]. 1954 [cited 2021 Mar 15];7(2):218–21. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/13211501/>
2. Cooper K. A means of assessing maximal oxygen intake. *JAMA*. 1968;203:201–4.
3. Léger LA, Lambert J. A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict {Mathematical expression}O₂ max. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* [Internet]. 1982 Jun [cited 2021 Mar 15];49(1):1–12. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00428958>
4. García GC, Secchi JD. Test course navette de 20 metros con etapas de un minuto. Una idea original que perdura hace 30 años. Vol. 49, *Apunts Medicina de l'Esport*. Elsevier Doyma; 2014. p. 93–103.
5. George JD, Fellingham GW, Fisher AG. A modified version of the rockport fitness walking test for college men and women. *Res Q Exerc Sport* [Internet]. 1998 [cited 2021 Mar 15];69(2):205–9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9635334/>
6. Margaria R, Aghemo P, Rovelli E. Measurement of muscular power (anaerobic) in man. *J Appl Physiol* [Internet]. 1966 [cited 2021 Mar 15];21(5):1662–4. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/5923240/>

7. Krstrup P, Mohr M, Amstrup T, Rysgaard T, Johansen J, Steensberg A, et al. The Yo-Yo intermittent recovery test: Physiological response, reliability, and validity. *Med Sci Sports Exerc* [Internet]. 2003 Apr 1 [cited 2021 Mar 15];35(4):697–705. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12673156/>
8. Cink RE, Thomas TR. Validity of the Astrand-Ryhming nomogram for predicting maximal oxygen intake. *Br J Sports Med*. 1981;15(3):182–5.
9. Bruce RA. Methods of exercise testing. Step test, bicycle, treadmill, isometrics. *Am J Cardiol*. 1974 May 20;33(6):715–20.
10. Haber P, Schlick W SP. Estimation of the performance spectrum of healthy adolescents by using the PWC 170 (Physical Work Capacity). *Acta Med Austriaca* [Internet]. 1976 [cited 2021 Mar 15];3(5):164–6. Available from: <https://europepmc.org/article/med/1020631>

Evaluaciones indirectas de consumo de oxígeno

Nombre: _____

Edad: _____ Peso: _____

Nivel de actividad: _____ (45 minutos más de tres veces por semana)

Objetivo:

Determinar el valor de $\dot{V}O_2$ máx. utilizando los protocolos revisados:

- **Test PWC 170**

Controlar parámetros de reposo.

Ajuste altura sillín bicicleta.

Calentamiento con carga de 50 watts durante 5 minutos.

	Carga (watts)	Frec. cardíaca	Presión arterial	SSF
Reposo				
2 minutos				
4 minutos				
6 minutos				
8 minutos				
10 minutos				

W_1 :

P:

P_1 :

P_2 :

$\dot{V}O_2$ máx.

- **Test del escalón Åstrand y Ryhming**

	FC inicial	FC máx.	FC15"	FC 30"

FC: _____

$\dot{V}O_2$ máx.: _____

- **Test de Cooper**

Distancia recorrida: _____

$\dot{V}O_2$ máx.: _____

Clasificación: _____



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CHILE



MANUAL DE ACTIVIDADES PRÁCTICAS EN FISIOLOGÍA DEL EJERCICIO

AUTORES:

Felipe A. Contreras Briceño

Maximiliano Espinosa Ramírez

Eduardo Moya Gallardo

EDITORES:

Óscar F. Araneda Valenzuela

Ginés Viscor Carrasco