

A.2.3 Sistemas energéticos

Comprensiones del programa de estudios

A.2.3.1 El cuerpo depende de los sistemas fosfagénico, glucolítico y oxidativo para la producción de energía para sostener la vida y la actividad física.

A.2.3.2 El consumo máximo de oxígeno ($V_{O2\text{máx}}$) está influido por la edad del individuo, las diferencias de sexo, la composición corporal, los factores de estilo de vida y el nivel de condición física.

A.2.3.3 El punto de inflexión del lactato es la intensidad máxima a la que el cuerpo puede metabolizar el lactato al mismo ritmo que su producción.

A.2.3.4 El consumo excesivo de oxígeno después del ejercicio (EPOC) es necesario para que el cuerpo vuelva a la homeostasis y depende del déficit de oxígeno que se produce durante el ejercicio. El EPOC se divide normalmente en dos subsecciones: rápido y lento.

Introducción

La cantidad y composición de carbohidratos, grasas y proteínas en la dieta determinan la disponibilidad de energía. Los macronutrientes que se pueden almacenar fácilmente en el cuerpo, como la grasa del tejido adiposo, se metabolizan más lentamente que las proteínas, para las que el cuerpo no tiene capacidad de almacenamiento. Por lo tanto, después de ingerir una comida que contenga todos los macronutrientes, el cuerpo metabolizará primero las proteínas, luego los carbohidratos y luego las grasas.

No toda la energía almacenada en los alimentos está disponible para el metabolismo humano. Algunos componentes, como la fibra, no se pueden digerir ni absorber, y esta energía se pierde en las heces. Aunque los nutrientes sean digeribles, existen vías metabólicas cuyos productos finales aún contienen energía. Un ejemplo es la producción de urea y amoníaco en el metabolismo de las proteínas. Estos compuestos aún contienen energía que se pierde en la orina. Solo la energía metabolizable de los alimentos es relevante para el metabolismo energético del cuerpo humano.

Metabolismo

El metabolismo se puede definir como todos los procesos químicos que se llevan a cabo en los organismos vivos y que son necesarios para el mantenimiento de la vida. El metabolismo consta de dos fases: anabolismo y catabolismo. Se definen de la siguiente manera:

- **Anabolismo** La fase constructiva del metabolismo en la que las moléculas más pequeñas se convierten en moléculas más grandes. Por ejemplo, las moléculas de glucosa se convierten en glucógeno.
- **Catabolismo** La fase destructiva del metabolismo en la que las moléculas más grandes se convierten en moléculas más pequeñas. Por ejemplo, los triglicéridos se convierten en glicerol y ácidos grasos.

El papel de las mitocondrias

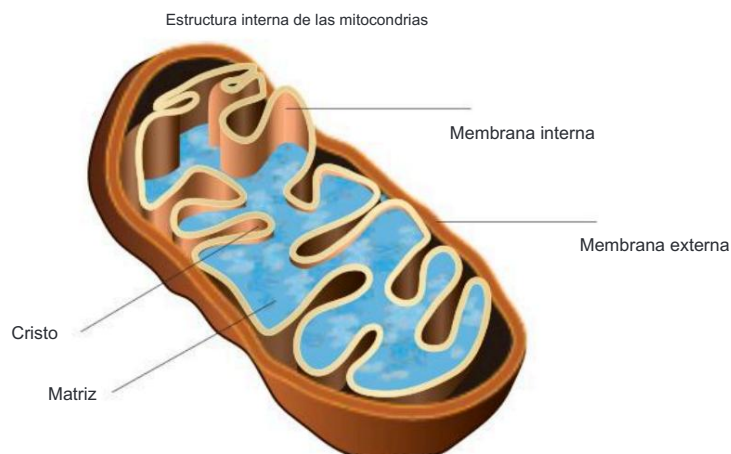
Todas las células del cuerpo humano necesitan una fuente de energía para realizar su trabajo biológico. Esto incluye todos los procesos implicados en el crecimiento y el mantenimiento de la función. Las células musculares también necesitan una fuente de energía para producir fuerza durante la contracción muscular.

Las mitocondrias son componentes celulares que desempeñan un papel importante en el suministro de energía a las células y son el único lugar en el que se utiliza el oxígeno. Con excepción de los glóbulos rojos, las mitocondrias están presentes en todas las células humanas. Las mitocondrias de las células facilitan los procesos bioquímicos del metabolismo aeróbico, incluido el ciclo de Krebs y la cadena de transporte de electrones.

El ciclo de Krebs es una serie de reacciones químicas que producen una gran cantidad de trifosfato de adenosina (ATP).

Estos procesos pueden producir ATP a partir de todos los grupos principales de alimentos de nuestra dieta.

Aunque los carbohidratos y las grasas son los principales sustratos energéticos, también se utilizan proteínas, que contribuyen con alrededor del 15% del metabolismo energético en reposo. La estructura de una mitocondria se muestra en la Figura 1.

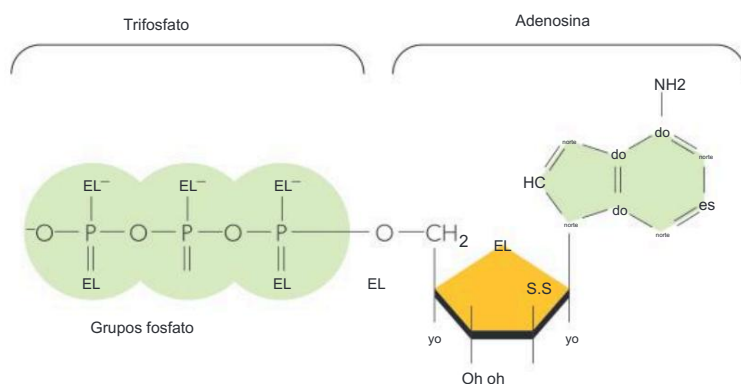


▲ Figura 1 Ultraestructura de una mitocondria

La moneda energética de las células: ATP

En las células se producen reacciones catabólicas que convierten la energía bioquímica de las moléculas orgánicas en una molécula llamada ATP. La liberación controlada de energía en forma de ATP se denomina respiración celular.

La figura 2 muestra la estructura de una molécula de ATP. Los enlaces entre los tres grupos de fosfato inorgánico son muy ricos en energía. Esta energía se libera cuando una molécula de ATP se combina con agua.

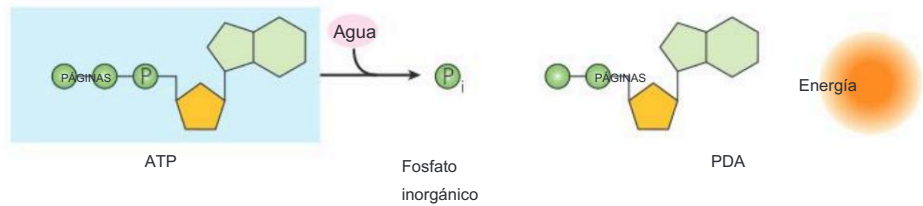


▲ Figura 2 Estructura química del ATP

Como resultado, el ATP pierde el último grupo fosfato de la cadena. Esta separación libera grandes cantidades de energía (Figura 3). En el proceso inverso, llamado fosforilación, el ATP se puede sintetizar añadiendo un grupo fosfato al compuesto adenosín difosfato (ADP).

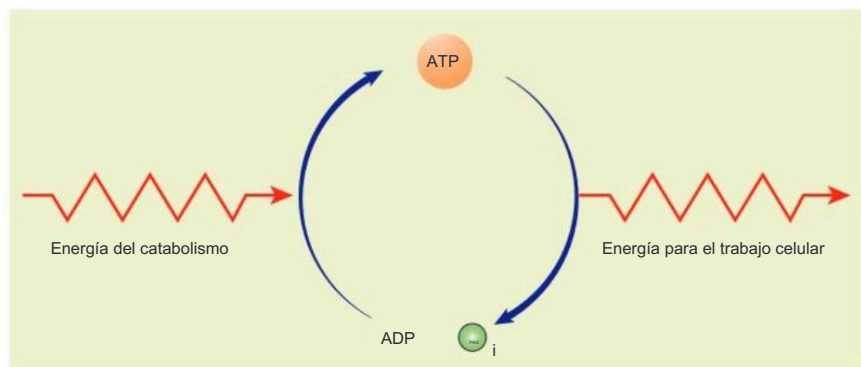
Término clave

Respiración celular La liberación controlada de energía en forma de ATP.



▲ Figura 3 La energía se libera del ATP cuando un grupo fosfato se separa

La molécula de ATP es el centro del metabolismo energético, ya que conecta las reacciones anabólicas y catabólicas. Por ejemplo, la energía química ingerida en forma de alimentos puede almacenarse en el cuerpo en forma de glucógeno o grasa. Sin embargo, para aprovechar esta energía disponible, primero debe convertirse en ATP. Ahora, la energía química en esta forma puede utilizarse para impulsar reacciones y procesos en el cuerpo que requieren energía (Figura 4). Este proceso universal ha hecho que el ATP se considere a menudo la moneda energética de la célula.



▲ Figura 4 Participación del ATP en el suministro de energía a las células

TOMÓ

El conocimiento del metabolismo energético y los sistemas energéticos y cómo la nutrición influye en el rendimiento deportivo se investigó principalmente en animales pequeños, principalmente ratones, ratas y hámsteres.

1. Discuta las preocupaciones éticas relacionadas con la investigación con animales.
2. Justificar la relevancia del conocimiento obtenido a partir de experimentos con roedores al metabolismo humano.

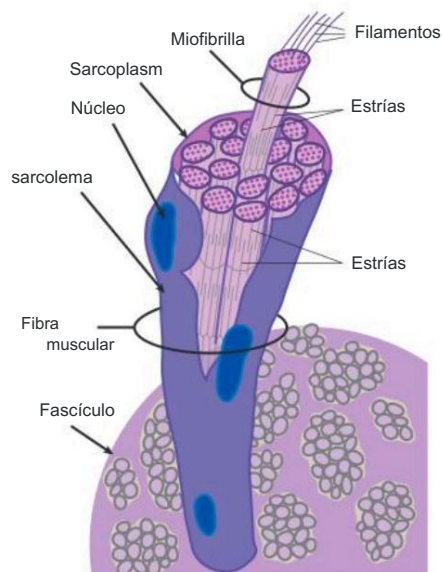
Energía para la contracción muscular

Un proceso importante en el cuerpo que requiere mucha energía es la contracción muscular. Cada fibra muscular que compone un músculo es en sí misma una sola célula alargada. Todas las fibras musculares tienen la capacidad bioquímica de producir ATP utilizando fuentes de energía como carbohidratos y grasas. Cuando el sistema nervioso estimula una fibra muscular para que se contraiga, las moléculas proteicas contráctiles que contiene (como la actina y la miosina) utilizan ATP para proporcionar la energía química necesaria para impulsar el proceso de contracción. Dado que el movimiento impulsado por los músculos es fundamental para el deporte y el ejercicio, es el ATP dentro de las fibras musculares el que proporciona toda la energía para que esto sea posible.

En el músculo hay suficiente ATP presente para permitir sólo 2 segundos de actividad muscular. Esto significa que cualquier ejercicio que dure más de 2 segundos debe utilizar ATP de otra fuente. Esta fuente de ATP proviene de una variedad de

vías bioquímicas dentro de la propia célula muscular, llamadas sistemas de energía.

Se refiere a un conjunto de reacciones catabólicas que ocurren dentro de todas las células cuya función principal es generar ATP. En las fibras musculares, el rendimiento de los sistemas energéticos influye en la contracción muscular; esto a su vez puede influir en nuestra capacidad para realizar diferentes tipos de ejercicio.



▲ Figura 5 Una fibra muscular

Metabolismo de los carbohidratos

Para liberar energía de los carbohidratos de nuestros alimentos, primero se digieren hasta los azúcares simples (monosacáridos): glucosa, fructosa y galactosa.

Estos son absorbidos por el torrente sanguíneo y transportados al hígado, donde la fructosa y la galactosa se convierten en glucosa, que desde allí se transporta a los demás órganos.

Descomposición de la glucosa en piruvato para obtener energía

La descomposición de la glucosa se produce en todas las células, en una parte de la célula llamada citosol. El proceso se denomina glucólisis e implica muchas reacciones.

La glucólisis conduce al metabolismo de la glucosa en piruvato y a la producción de energía en forma de ATP. Cuando hay oxígeno disponible, el piruvato entra en las mitocondrias, donde se oxida a dióxido de carbono y agua. En condiciones anaeróbicas (por ejemplo, en ejercicios breves de alta intensidad), el piruvato se convierte en lactato. El lactato se transporta de vuelta al hígado, donde se vuelve a formar la glucosa en un proceso llamado gluconeogénesis, o se oxida a piruvato en los músculos.

Conversión de glucosa en glucógeno para almacenamiento

En las células del hígado y de los músculos, la glucosa se convierte en glucógeno cuando la dieta aporta más glucosa de la que el tejido necesita. El glucógeno es la forma de almacenamiento de la glucosa. En un proceso llamado glucogenogénesis, muchas moléculas de glucosa se unen para formar glucógeno.

Cuando el cuerpo necesita más glucosa de la que ingiere, el glucógeno se descompone en glucosa en el hígado y glucosa-6-fosfato en los músculos. Este proceso se denomina glucogenólisis. El glucógeno muscular solo se utiliza para proporcionar una fuente de energía inmediata al músculo, mientras que el glucógeno hepático proporciona glucosa a todos los demás órganos.

Punto clave

La glucosa se descompone para proporcionar energía. Este proceso se conoce como glucólisis (la descomposición de la glucosa en piruvato).

La glucosa que no se utiliza inmediatamente se almacena como glucógeno. Esta conversión de glucosa en glucógeno se denomina glucogénesis. Cuando se necesita la energía almacenada en el glucógeno, se convierte nuevamente en glucosa. Este proceso se conoce como glucogenólisis (la conversión de glucógeno en glucosa).

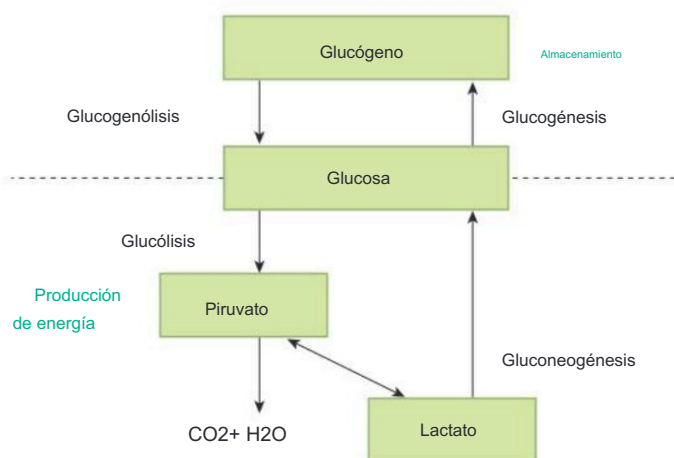


Figura 6 Vías del metabolismo de los carbohidratos

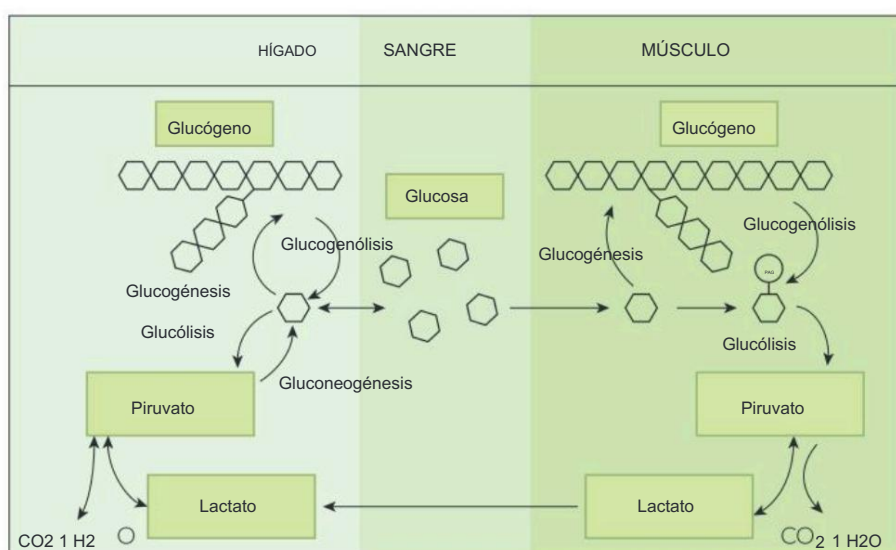


Figura 7 El hígado y el músculo juegan un papel importante en el metabolismo de los carbohidratos.



Actividad 1

Dibuja tu propio diagrama para mostrar la relación entre:

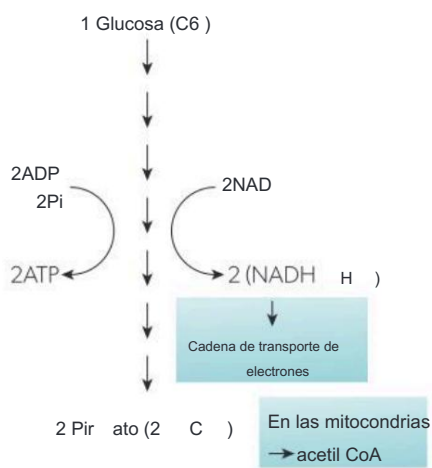
- hígado
- músculo
- torrente sanguíneo
- alimento
- glucosa
- glucógeno
- lactato
- dióxido de carbono
- agua
- glucólisis (aeróbica, anaeróbica)
- glucogenólisis
- glucogénesis.

Sistema de energía aeróbica (oxidativa)

Oxidación de la glucosa

El producto final de la glucólisis, el piruvato, tiene un destino diferente según las condiciones metabólicas de las células (Figura 8). Durante condiciones metabólicas menos exigentes, el piruvato se convierte en acetil coenzima A (CoA). Este compuesto

Entra en el ciclo de Krebs en las mitocondrias, donde las reacciones químicas que involucran oxígeno lo convierten en agua y dióxido de carbono. Durante la glucólisis y el ciclo de Krebs se liberan iones de hidrógeno. Las coenzimas específicas unen los iones de hidrógeno y los llevan a la cadena de transporte de electrones, donde se produce energía. Esta energía es necesaria para formar ATP, como se describe en la sección La moneda energética de la célula: ATP.



▲ Figura 8 Oxidación aeróbica de glucosa

Oxidación de grasas

El proceso que produce energía en el metabolismo de las grasas es la beta-oxidación de los ácidos grasos. La beta-oxidación se produce en las mitocondrias, a las que se transportan los ácidos grasos con la ayuda de la enzima transportadora carnitina. Las enzimas de la beta-oxidación se encuentran en la matriz de las mitocondrias. Los ácidos grasos se descomponen gradualmente en moléculas de acetil CoA acortando la cadena de ácidos grasos. Esta beta-oxidación de los ácidos grasos implica un ciclo repetido de cuatro reacciones, reduciendo la cadena de ácidos grasos en dos carbonos en cada ciclo. Esto ya genera energía, pero se libera más energía cuando el acetil CoA producido se metaboliza aún más en el ciclo de Krebs.

Término clave

β-oxidación Proceso de liberación de energía de los ácidos grasos.

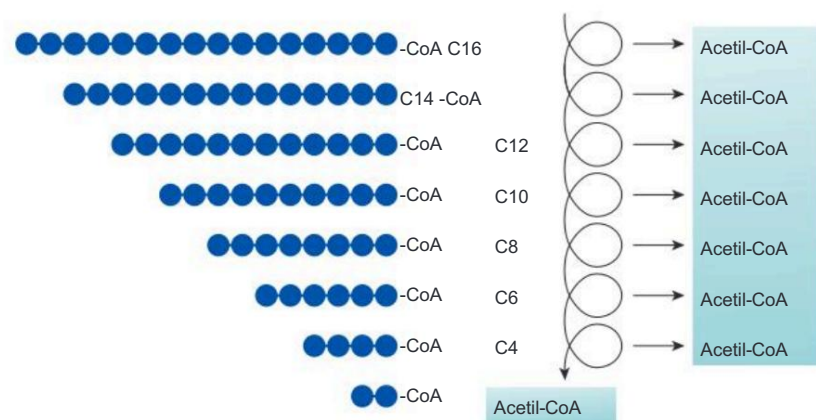


Figura 9 β-oxidación del ácido palmítico

La oxidación varía ligeramente según la longitud de la cadena de los ácidos grasos, si tienen enlaces dobles y cuántos de ellos tienen. Las investigaciones realizadas tanto en animales como en humanos han demostrado que el cuerpo prefiere metabolizar los ácidos grasos mono y poliinsaturados antes que los saturados. Esto significa que la elección del tipo correcto de grasa en la dieta puede prevenir enfermedades crónicas, como las que afectan a las arterias del corazón. La razón es que cuanto más lenta es la oxidación de los ácidos grasos, más tiempo permanecen en el torrente sanguíneo. Los ácidos grasos contribuyen a las reacciones que forman el colesterol, que posteriormente puede depositarse en la pared de los vasos.

Lipólisis Proceso de liberación de triglicéridos de las reservas de grasa del cuerpo. El exceso de grasa se almacena en los tejidos adiposos y los músculos.

Los ácidos grasos quedan entonces disponibles para la β -oxidación generadora de energía.

Cuando la capacidad del metabolismo aeróbico es limitada (por ejemplo, el oxígeno o las mitocondrias tienen un suministro limitado), el piruvato se convierte en lactato. Esto se conoce como sistema glucolítico. Aunque produce solo una pequeña cantidad de ATP (dos moléculas), este proceso ocurre muy rápidamente. Esto significa que este sistema energético es óptimo para satisfacer las altas demandas energéticas del ejercicio duro, especialmente cuando el aporte de PCr está comenzando a disminuir. Sin embargo, esta energía de alta velocidad tiene una consecuencia: al igual que el sistema de los fosfágenos, solo se puede mantener durante un corto período de tiempo.



▲ **Figura 11** Utilización anaeróbica de la glucosa

Regulación hormonal del metabolismo energético

El metabolismo energético está controlado por muchas hormonas, entre ellas la insulina, el glucagón, la epinefrina, el cortisol y las hormonas del crecimiento.

Después de comer, la concentración de glucosa en la sangre aumenta. Esta es una señal para que el páncreas secrete insulina. La insulina aumenta el transporte de glucosa a las células, especialmente a las células del músculo esquelético y las células del hígado (Figura 12). Los músculos esqueléticos necesitan glucosa para funcionar correctamente, pero la glucosa no puede entrar en las células musculares por sí sola. El transportador de glucosa GLUT4 es clave para la absorción de glucosa en el músculo esquelético. Es decir, GLUT4 ayuda a que la glucosa entre en las células musculares para que puedan usarla como energía. Piense en GLUT4 como puertas en la superficie de sus células musculares. Estas puertas generalmente están cerradas, lo que impide que la glucosa entre en las células. Para permitir que la glucosa entre en las células musculares, su cuerpo necesita una "llave", que es la hormona insulina. Cuando la insulina estimula las "puertas" de GLUT4, la glucosa puede entrar rápidamente en las células musculares. Una vez dentro, las células pueden usar la glucosa para producir energía.

La rápida absorción de glucosa en la sangre inhibe la liberación de glucosa de los depósitos hepáticos y musculares y promueve la síntesis de glucógeno en el hígado y el músculo. La insulina estimula la glucólisis para reducir los niveles de glucosa en sangre después de una comida y señalar la disponibilidad de energía a todos los órganos. Inhibe la gluconeogénesis (la conversión de proteínas o grasas en glucosa) y promueve la glucogénesis (la conversión de glucosa en glucógeno). La insulina también inhibe la lipólisis en los depósitos de grasa y la descomposición de las proteínas (también promueve la síntesis de proteínas).

Durante un periodo prolongado sin ingesta de alimentos (ayuno) o con ejercicio, la concentración de glucosa en sangre disminuye, lo que provoca la secreción de la hormona glucagón. El glucagón es secretado por el páncreas y actúa de forma opuesta a la insulina. Estimula la glucogenólisis y la síntesis de glucosa, lo que aumenta el nivel de glucosa en sangre, una señal de que la glucosa está siendo transportada a los órganos para su utilización como energía. El glucagón también activa la lipólisis de los triglicéridos en los depósitos de grasa, lo que posteriormente contribuye al suministro de energía. Una baja concentración de glucosa en sangre también estimula la epinefrina, que actúa como el glucagón en los procesos de degradación del glucógeno y lipólisis.

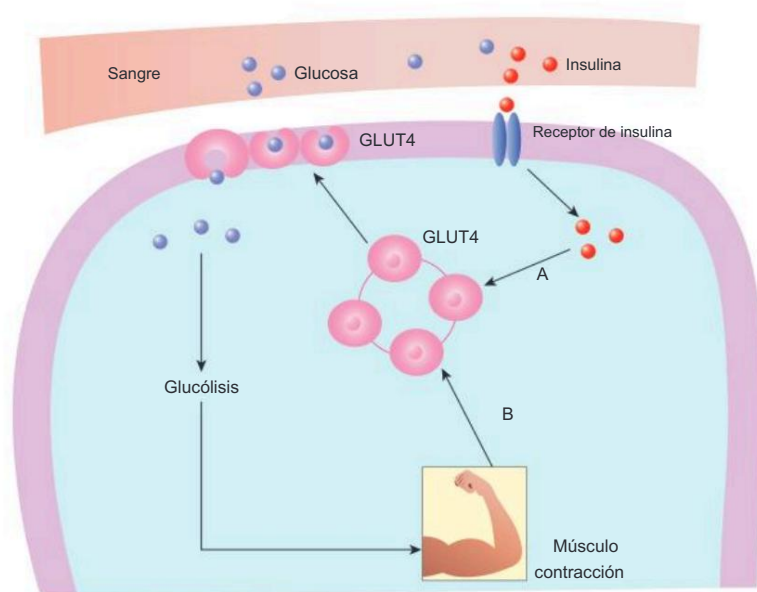


Figura 12 Mecanismos de captación de glucosa en el músculo esquelético. (A) captación de glucosa estimulada por insulina, (B) captación de glucosa estimulada por la contracción muscular. GLUT4: transportador de glucosa 4

Pregunta de enlace

¿Cómo afecta la falta de ATP a la contracción muscular? (B1.3)

Considerar:

- El ATP es la energía primaria.
Fuente utilizada por las células musculares durante la contracción muscular.
- Las células musculares tienen una capacidad limitada.
cantidad de ATP almacenada
- ¿Qué ocurrirá si la síntesis de ATP no puede satisfacer la demanda de ATP?

Puntos clave

- Cuando empezamos a hacer ejercicio
Son los sistemas anaeróbicos los que dominan el suministro de energía.
El ATP preexistente dentro del músculo proporciona energía durante los primeros 2 segundos, luego la contribución de PCr (a través del sistema de fosfágeno) se desvanece después de los primeros 20 segundos, después de lo cual la activación creciente del sistema glucolítico domina el suministro de energía. Esto también es de corta duración y, a medida que el ejercicio continúa, una activación creciente del sistema de energía aeróbica, conocido como sistema oxidativo, significa que éste domina rápidamente el suministro de energía.
- Las grasas sólo se pueden utilizar durante actividades aeróbicas, no durante actividades anaeróbicas de alta intensidad.

Aplicaciones de pensamiento

La medición del nivel de azúcar en sangre mediante un glucómetro proporciona un método fácil, preciso y autoadministrado para evaluar la concentración de glucosa en sangre. Esto es importante para las personas con diabetes, en quienes la regulación de la glucosa en sangre por la insulina está alterada. Tanto una concentración alta como baja de azúcar en sangre puede ser perjudicial.



▲ Figura 13 Uso de un monitor de glucosa en sangre

Aplicaciones de investigación

La investigación sobre el papel de los carbohidratos en el ejercicio y, en particular, en el rendimiento de resistencia se convirtió en la base de la práctica dietética de muchos atletas. Una dieta rica en carbohidratos mejora el rendimiento de resistencia y la ingesta de carbohidratos durante el ejercicio retrasa la fatiga.

1. Investigar el uso de bebidas deportivas y barras energéticas como medio para la ingesta de carbohidratos durante el rendimiento de resistencia.
2. Analice el desarrollo de una industria multimillonaria de productos de nutrición deportiva que evolucionó a partir del conocimiento del efecto de los carbohidratos en el rendimiento y cómo esta industria puede influir en la investigación futura.

Características de los sistemas energéticos y sus contribuciones durante el ejercicio Durante el ejercicio,

todas las fuentes de combustible y los sistemas energéticos que

las utilizan entran en juego para satisfacer la demanda de ATP. La velocidad a la que los sistemas energéticos pueden sintetizar ATP varía, siendo la oxidación de grasas la más lenta y el sistema de fosfágenos el más rápido. Por lo tanto, tiene sentido que los sistemas energéticos más rápidos dominen cuando se requiere ATP a tasas altas, como las necesarias para soportar el ejercicio de alta intensidad (Figura 14).

En el primer momento de la contracción muscular, las reservas de PC se utilizan para proporcionar energía. Durante el ejercicio de intensidad ligera a moderada, la energía se obtiene de la glucosa, inicialmente de la glucólisis anaeróbica hasta que el sistema aeróbico puede convertir la glucosa almacenada en energía. Para mantener el suministro de energía por glucosa, el músculo aumenta la absorción de glucosa de la sangre. La contracción muscular estimula el transporte de glucosa desde el depósito de almacenamiento interno de la célula hasta la membrana celular, pero de forma

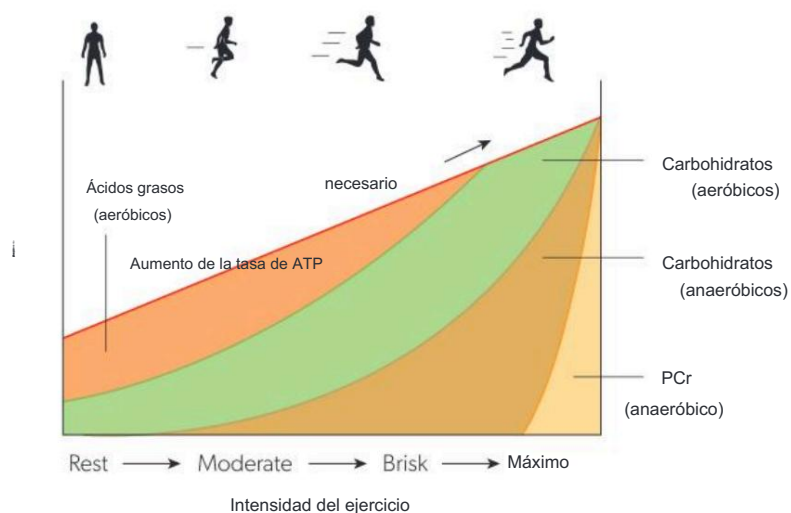


Figura 14 Relación entre la intensidad del ejercicio y la tasa de demanda de energía (ATP). Tanto la tasa global de ATP La producción y el mecanismo de su síntesis cambian con la intensidad.

La insulina transporta la glucosa de forma diferente a la insulina (Figura 12). El transporte de glucosa inducido por la insulina se produce durante las fases de reposo. El ejercicio reduce la concentración de insulina en la sangre y, por lo tanto, reduce su función en el transporte de glucosa.

La glucosa (anaeróbica y/o aeróbica) es importante en todo el rango de intensidades de ejercicio. Sin embargo, los ácidos grasos solo se utilizan durante el ejercicio de menor intensidad. Por encima del 90 % del ejercicio máximo, aproximadamente, no se utilizan ácidos grasos libres en absoluto. Por el contrario, la PCr solo contribuye durante el ejercicio breve de alta intensidad; ya no contribuye después de 20 segundos de ejercicio a máxima intensidad.

Por supuesto, el ejercicio nunca es tan sencillo: rara vez mantenemos un ritmo o una frecuencia de trabajo constantes. Puede haber ráfagas repetidas de actividad de alta intensidad, por ejemplo, durante los partidos de equipo, en los que se utiliza el metabolismo anaeróbico (sistema glucolítico y sistema de los fosfágenos), interrumpidas por períodos de menor esfuerzo en los que puede producirse la recuperación. De manera similar, durante una carrera más larga, a un ritmo aparentemente constante, la velocidad puede cambiar, con ráfagas de carrera más rápida al principio y un sprint hacia la meta.

En resumen, la contracción muscular durante el ejercicio de cualquier tipo y nivel de intensidad requiere ATP. La alta tasa de trabajo mecánico requerida durante el ejercicio intenso requiere una alta tasa de provisión de ATP. Esto solo se puede lograr mediante los rápidos procesos metabólicos del sistema glucolítico y la PCr. Los procesos más lentos asociados con el metabolismo aeróbico están activos durante los esfuerzos de ejercicio más prolongados y lentos. La Figura 15 ilustra la contribución relativa de los sistemas de energía durante diferentes tipos de ejercicio.

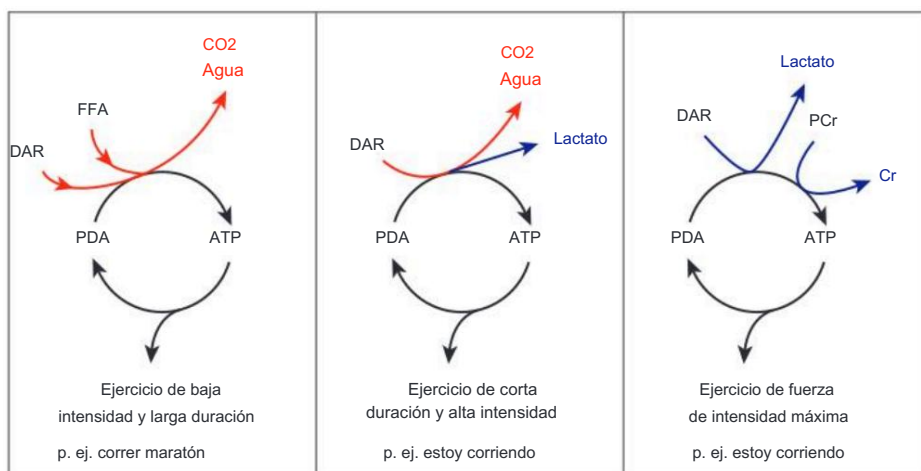


Figura 15 Contribuciones relativas a la síntesis de ATP durante tres tipos diferentes de esfuerzo físico.

El contenido representa el ejercicio aeróbico. El metabolismo y el azul metabolismo anaeróbico. CHO: carbohidratos (glucosa); FFA: ácidos grasos libres; PCr: fosfato de creatina; Cr: creatina.



Actividad 2

Contribución de los diferentes sistemas energéticos durante los diferentes tipos de deporte 1. Evalúe

los sistemas energéticos dominantes durante los deportes que se muestran en

Figura 16:

un.

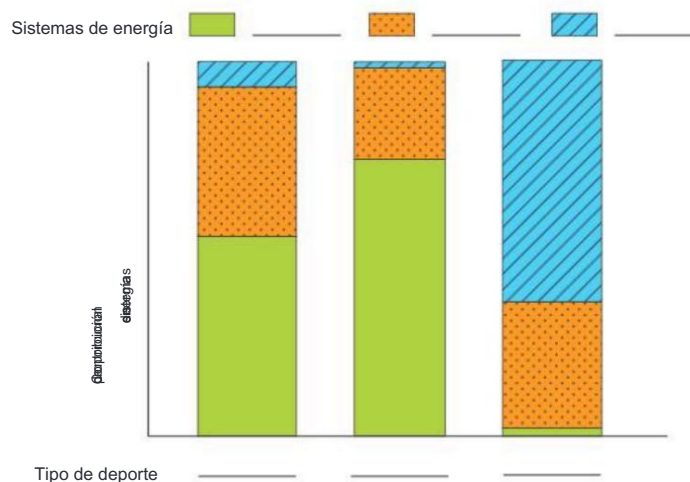
b. Tour de Francia en bicicleta

c. salto de altura.



▲ Figura 16

2. Etiqueta el diagrama de la Figura 17 según el tipo de deporte en el Eje x y sistemas energéticos (diferentes cuadros de color). Elija entre los sistemas fosfagénico, glucolítico y oxidativo.



▲ Figura 17

Consumo máximo de oxígeno ($\dot{V} \cdot O_2\text{max}$) y resistencia

El consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_2\text{máx}$) es la tasa máxima a la que un individuo puede absorber y utilizar oxígeno. Es un factor clave en la resistencia. El $\text{VO}_2\text{máx}$ es el estándar de oro que se utiliza para evaluar la función cardiovascular y respiratoria de un individuo.

Los factores que afectan el $\text{VO}_2\text{máx}$ se pueden dividir en dos categorías: factores circulatorios centrales (como el gasto cardíaco máximo) y factores periféricos (como los músculos esqueléticos). En la mayoría de las personas sanas, el factor determinante principal del $\text{VO}_2\text{máx}$ es la capacidad del sistema cardiovascular para suministrar oxígeno. Sin embargo, existen excepciones a esta regla, incluso en el caso de personas afectadas por alguna enfermedad.

$\dot{V} \cdot O_2\text{max}$ absoluto y relativo Al comparar

los valores de $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$ entre diferentes poblaciones es fundamental reconocer que los valores pueden expresarse en dos formatos.

- El $\text{VO}_2\text{máx}$ absoluto se expresa en litros por minuto ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$).
- El $\text{VO}_2\text{máx}$ relativo se normaliza según la masa corporal en mililitros por minuto por kilogramo ($\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$), que se reescribe como mililitros por kilogramo por minuto ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

Para las actividades que se consideran que implican soportar peso, es más apropiado utilizar el valor relativo de $\text{VO}_2\text{máx}$, ya que esto intenta tener en cuenta las diferencias individuales en tamaño y masa. Esto es importante ya que las diferencias en tamaño y masa explican la mayor parte de la variabilidad en los valores absolutos de $\text{VO}_2\text{máx}$ entre individuos, debido a factores como la masa muscular activa, el tamaño del corazón y el volumen sanguíneo.

Por ejemplo, un adulto sano no entrenado con una masa corporal de 70 kg puede tener un $\text{VO}_2\text{máx}$ absoluto de $3,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a $42,9 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, lo que significa un $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$ relativo de min^{-1} ($3,0 \times 1000$ para convertir litros a ml, luego dividir por 70 kg). Por el contrario, un jugador de hockey de 58 kg también puede tener un $\text{VO}_2\text{máx}$ absoluto de $3,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, pero un $\text{VO}_2\text{máx}$ relativo de $51,7 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ refleja sus adaptaciones al entrenamiento que significan que podrá correr a velocidades más rápidas y durante más tiempo que el adulto no entrenado.

Los valores más elevados de $\text{VO}_2\text{máx}$ se han registrado en esquiadores de fondo (superiores a $90 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$). Por el contrario, en los enfermos graves los valores pueden ser considerablemente inferiores, incluso inferiores a $20 \text{ ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. El patrón general es que el $\text{VO}_2\text{máx}$ relativo refleje la aptitud cardiorrespiratoria, aunque hay que reconocer que sigue habiendo mucha variación individual y que se trata de promedios poblacionales (Tabla 1).

▼ Tabla 1 Rangos típicos relativos de $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$ para adultos de 20 años

	$\text{VO}_2\text{máx}$ relativo típico ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	
Estado de entrenamiento	Macho biológico	Hembra biológica
deportistas de equipo	40–45	35–40
profesionales	45–55	40–50
moderadamente entrenados pero no	50–60	45–55
entrenados, deportistas de resistencia de alto nivel	>65	55–60

Diferencias de sexo y $\text{VO}_2\text{máx}$ Los valores absolutos

de $\text{VO}_2\text{máx}$ suelen ser considerablemente más bajos en las mujeres biológicas que en los hombres, principalmente debido a un tamaño corporal más pequeño. Sin embargo, incluso cuando se expresa en términos relativos, las mujeres suelen tener valores de $\text{VO}_2\text{máx}$ más bajos que los hombres, como se muestra

Puntos clave

- El $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$ se puede mejorar mediante el entrenamiento.
- Diferencias individuales y
Los factores genéticos tienen influencia en el $\text{VO}_2\text{máx}$.
- Uno de los factores clave
La determinación del rendimiento de resistencia es $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$.



Patrones y tendencias

Hay muchas personas con una masa corporal baja y un alto nivel de grasa corporal, y hay muchos atletas con una masa corporal alta y un bajo nivel de grasa corporal. Al considerar los valores absolutos ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$) comparados con los relativos al peso ($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) de $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$, ¿qué conclusiones podría sacar acerca de cómo la composición corporal influye en el $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$ y cómo los factores del estilo de vida pueden influir en el $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$?

En la Tabla 1, las mujeres biológicas presentan en promedio un $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ entre un 15% y un 25% menor que los hombres biológicos para una edad y un estado físico determinados, aunque entre los atletas la diferencia es menor.

Los factores principales que contribuyen a estas diferencias típicas en el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ son los siguientes: Sigue.

- Gasto cardíaco: las mujeres biológicas suelen tener un corazón más pequeño en comparación con los hombres biológicos (incluso cuando se normaliza por el tamaño corporal), así como un llenado cardíaco reducido y una menor capacidad para bombear sangre.
- Volumen sanguíneo: la capacidad de transportar oxígeno en la sangre también suele ser menor en unidades absolutas y relativas en las mujeres biológicas.
- Concentración de hemoglobina: los varones biológicos suelen tener una concentración ligeramente superior. concentración de hemoglobina en la sangre.
- Capacidad pulmonar: las hembras biológicas suelen tener un volumen pulmonar menor y capacidades en comparación con los machos biológicos.
- Composición corporal: dividir por la masa corporal no tiene en cuenta el porcentaje naturalmente más alto de grasa corporal que no utiliza oxígeno en las mujeres biológicas.

Las diferencias pueden reducirse cuando el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ se expresa en relación con la masa libre de grasa (o masa muscular activa).

Las diferencias de sexo en cuanto al tamaño corporal y la masa muscular también contribuyen a que las mujeres biológicas tengan una fuerza, una potencia y un rendimiento anaeróbico generalmente inferiores. De manera similar, los elementos estructurales del sistema de energía aeróbica son específicos de cada sexo.

Un factor adicional que afecta la resistencia son las diferencias en la biomecánica de la carrera.

Cuando el cuerpo humano se encuentra en posición neutra, la articulación de la cadera realiza una flexión/ extensión en el plano sagital (capítulo B.1.1). Durante las carreras de resistencia, las mujeres biológicas tienden a tener un mayor movimiento no sagital de la articulación de la cadera (y la rodilla).

Esto puede explicarse en parte por diferencias anatómicas, como una pelvis más ancha y una longitud de las extremidades inferiores más corta en relación con la altura total.

Curiosamente, algunos estudios también han demostrado que las atletas biológicamente femeninas tienen una mayor área proporcional de fibras musculares de contracción lenta y son más capaces de utilizar ácidos grasos (y conservar carbohidratos) durante carreras prolongadas. Sin embargo, otros factores (por ejemplo, una menor capacidad de transporte de oxígeno en la sangre) parecen contrarrestar estas posibles ventajas.

V $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ y edad Otro factor

importante que influye en el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ es la edad. Los niños suelen tener valores absolutos de $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ mucho más bajos que los adultos debido a su tamaño. Durante la infancia y la adolescencia, el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ absoluto aumenta de acuerdo con los patrones de crecimiento y maduración, alcanzando un máximo a principios y mediados de la adolescencia para las mujeres biológicas y a principios de los 20 años para los hombres biológicos.

Cuando se consideran los cambios de $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ con la edad, la forma de expresar los valores de $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ se vuelve importante. Expresarlo en relación con el peso corporal revela los efectos del aumento de peso en el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ a medida que los niños se convierten en adolescentes y maduran hasta la edad adulta. Para actividades que soportan peso (por ejemplo, actividades que implican correr) es más apropiado usar $\text{ml kg}^{-1}\text{min}^{-1}$, mientras que para ejercicios que no soportan peso, como andar en bicicleta, es aceptable usar cualquiera de los dos.

En adultos sedentarios, el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ generalmente disminuye alrededor de un 10% por década.

Los atletas de resistencia entrenados comenzarán con un $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ más alto, y si su $\dot{V}O_{2\text{máx}}$

Si la tasa de mortalidad hubiera disminuido al mismo ritmo, seguiría siendo mayor que la de los individuos sedentarios de la misma edad cronológica.

En las mujeres biológicas, el $\text{VO}_2\text{máx}$ absoluto alcanza su punto máximo a mediados de la adolescencia. Sin embargo, el $\text{VO}_2\text{máx}$ relativo en realidad tiende a disminuir a partir de los primeros años de la adolescencia, en parte debido a los cambios en la composición corporal (mayor acumulación de grasa corporal y menor masa muscular durante la pubertad), posiblemente además de los cambios en los patrones de actividad física.

Sin embargo, en varones biológicos, cuando los valores se normalizan a la masa corporal, los niños y adolescentes tienen valores muy similares a los de los adultos sanos. En otras palabras, el $\text{VO}_2\text{máx}$ relativo es muy similar en adultos y niños. ¿Significa esto que un niño entrenado debería ser capaz de correr una maratón en el mismo tiempo que un adulto entrenado? Los niños, por supuesto, no podrían lograr tiempos tan rápidos. Esto ilustra que la normalización del $\text{VO}_2\text{máx}$ a la masa corporal no puede explicar por completo las diferencias en el rendimiento de resistencia real, por diversas razones.

A partir de la edad adulta, independientemente de las diferencias de sexo, el $\text{VO}_2\text{máx}$ relativo suele disminuir aproximadamente un 1% cada año en promedio. Esto refleja una disminución gradual de la frecuencia cardíaca máxima que se puede alcanzar, aunque nuevamente los cambios en los patrones de actividad física pueden contribuir. Por lo tanto, para un joven de 20 años sano y sin entrenamiento con un $\text{VO}_2\text{máx}$ de 45 $\text{mlkg}^{-1}\text{min}^{-1}$, el envejecimiento natural significaría que a los 45 y 70 años se esperaría que el $\text{VO}_2\text{máx}$ hubiera disminuido a 35,0 $\text{mlkg}^{-1}\text{min}^{-1}$ y 27,2 $\text{mlkg}^{-1}\text{min}^{-1}$, respectivamente. Esto implica una disminución constante de la capacidad de resistencia a medida que envejecemos, y cualquier enfermedad o lesión acelerará esta disminución.

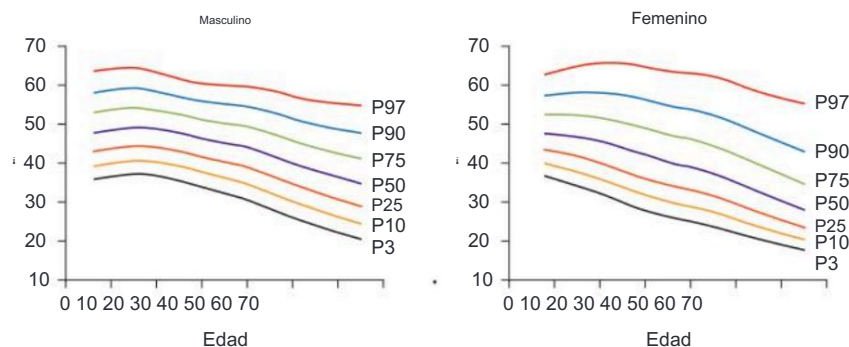
Sin embargo, es muy importante destacar que esto no significa que todas las personas mayores tengan valores de VO_2max muy bajos y una capacidad de resistencia limitada. Aunque la magnitud de la respuesta al entrenamiento se reduce a medida que envejecemos, el ejercicio físico aún puede inducir mejoras significativas en el VO_2max en las personas mayores, de modo que una persona de 65 años entrenada puede tener un VO_2max más alto que una persona de 30 años sin entrenamiento y con sobrepeso.

De hecho, los atletas Masters compiten en todo el mundo hasta el final de sus vidas.

Un ejemplo notable es el de Fauja Singh (Figura 18). Singh completó el maratón de Toronto Waterfront en 2011, ¡cuando tenía 100 años!



▲ Figura 18 Fauja Singh



▲ Figura 19 VO_2max según edad y sexo. Adaptado de van der Steeg, Takken (2021)

¿Cómo aumenta el entrenamiento el $\text{VO}_2\text{máx}$?

Las respuestas al entrenamiento después de un período de entrenamiento aeróbico respaldan la idea de que el entrenamiento puede aumentar el $\text{VO}_2\text{máx}$. Los aumentos del $\text{VO}_2\text{máx}$ se sustentan, al menos en parte, en cambios inducidos por el entrenamiento en el corazón y el sistema cardiovascular (adaptaciones centrales). Los aumentos se ven favorecidos por algunos cambios dentro del músculo (adaptaciones periféricas).

Pregunta de enlace

¿Cómo afecta el nivel de aptitud aeróbica de una persona a su fortaleza mental? (C.1.2)

Considerar:

- ejercicio aeróbico, mejora de la función cognitiva, reduce el estrés y la ansiedad y aumenta la resiliencia
- El ejercicio aeróbico puede ayudar a las personas a desarrollar fortaleza mental al mejorar su capacidad para superar el malestar y los desafíos físicos.
- desafío físico, confianza y motivación
- ejercicio aeróbico y un sentido de logro y autoeficacia.

Punto clave

El entrenamiento aeróbico puede aumentar el $\text{VO}_2\text{máx}$. El mecanismo principal es el aumento del volumen sistólico, aunque también contribuyen otras adaptaciones en los sistemas cardiovascular y muscular.

La principal respuesta al entrenamiento es un aumento del volumen sistólico en valores submáximos y máximos. Por el contrario, la respuesta de la frecuencia cardíaca se reduce en intensidades submáximas. La frecuencia cardíaca máxima en realidad no cambia con el entrenamiento, pero alcanzarla requiere que la persona trabaje más duro en comparación con antes del entrenamiento (su capacidad ha mejorado).

El mecanismo responsable del aumento del volumen sistólico es principalmente un aumento del volumen del ventrículo izquierdo, lo que significa que más sangre puede llenar el ventrículo antes de cada contracción. Además de algunos cambios en la sangre, los músculos también desarrollan más capilares para que más sangre pueda suministrar oxígeno a los músculos en ejercicio. En términos del uso de oxígeno, también hay algunas adaptaciones que ocurren dentro del propio músculo para aumentar la cantidad de oxígeno que se extrae de la sangre a medida que pasa. En conjunto, estas adaptaciones centrales y periféricas permiten que un individuo haga ejercicio más duro a medida que aumenta su $\text{VO}_2\text{máx}$.



Actividad 3

La evidencia de los estudios de entrenamiento sugiere que al menos parte de la variación en el $\text{VO}_2\text{máx}$ entre individuos puede explicarse por la variación genética.

Sin embargo, no hay duda de que el entrenamiento puede tener un impacto positivo en el $\text{VO}_2\text{máx}$.

Esto plantea una pregunta clásica sobre la condición física: ¿se debe a la naturaleza (genética) o a la crianza (entrenamiento)? Algunas investigaciones muy esclarecedoras han comparado las adaptaciones al entrenamiento de gemelos idénticos con las de gemelos no idénticos. Curiosamente, ambos grupos de gemelos mejoraron, pero las respuestas fueron más similares en los gemelos idénticos que en los no idénticos, a pesar de que los programas de entrenamiento eran idénticos y los niveles iniciales de condición física eran similares.

- ¿Por qué dichas investigaciones implican que la genética debe al menos desempeñar algún papel?
- ¿Por qué el uso de gemelos en ambos grupos ayudó a responder la pregunta naturaleza versus crianza?

Una buena manera de pensar en esto es que cada persona puede tener un $\text{VO}_2\text{máx}$ "techo" que está determinado por sus genes, pero esto solo se volverá limitante una vez que esa persona haya entrenado y aumentado su $\text{VO}_2\text{máx}$ tanto como sea posible.

Por lo tanto, las personas con un $\text{VO}_2\text{máx}$ bajo sin entrenamiento no pueden culpar a sus genes, ya que no han alcanzado su techo genético.

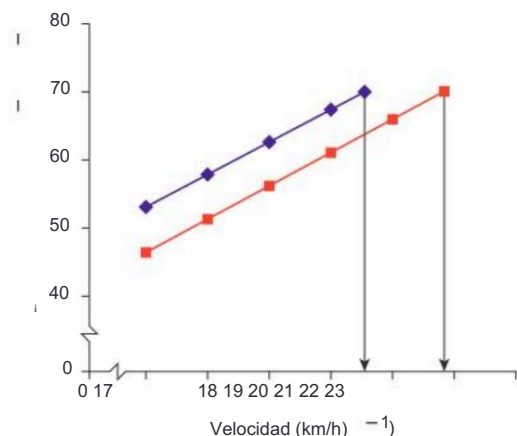
$\text{VO}_2\text{máx}$ y tipo de ejercicio Un último factor que puede

influir aún más en los valores registrados de $\text{VO}_2\text{máx}$ es el tipo de ejercicio que se realiza. Dentro del mismo individuo, la tasa más alta de consumo de oxígeno que se registra será diferente dependiendo de si la persona está corriendo o montando en bicicleta, por ejemplo. Como se utiliza más masa muscular durante la carrera (en comparación con el ciclismo, se utilizan más los músculos de la parte superior del cuerpo y los músculos posturales, ya que se trata de una actividad que soporta peso), sería de esperar que se registrara un $\text{VO}_2\text{máx}$ más alto en comparación con el ciclismo. Esta es la razón principal que sustenta por qué los valores más altos observados se dan en esquiadores de fondo y no en corredores. El esquí de fondo supone una demanda de oxígeno aún mayor para los músculos de la parte superior del cuerpo, además de los músculos de la parte inferior del cuerpo y los músculos posturales que trabajan más en ambos tipos de ejercicio.

Economía de carrera El consumo de

oxígeno en estado estable ($\dot{V} \cdot \text{O}_2$) a una velocidad de carrera determinada se conoce como economía de carrera (RE). La RE refleja la demanda de energía de la carrera.

a una velocidad submáxima constante. Los corredores con buena RE utilizan menos oxígeno que los corredores con mala RE a la misma velocidad en estado estable. Se cree que la RE es un predictor útil del rendimiento en carreras de resistencia. Los perfiles de RE de dos corredores adultos con igual $\text{VO}_{2\text{máx}}$ se muestran en la Figura 20.



▲ Figura 20 Perfiles de economía de carrera de dos

Atletas que tienen el mismo $\text{VO}_{2\text{máx}}$

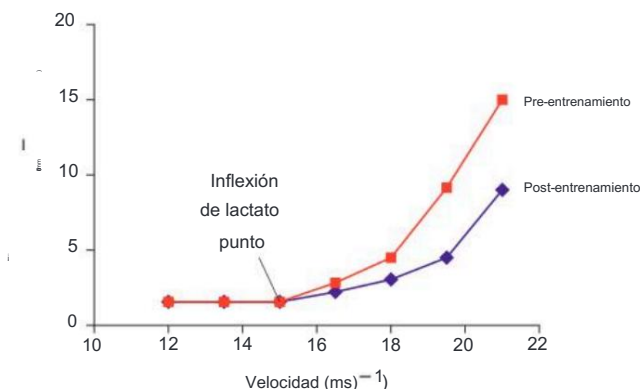
La RE de un atleta representa el funcionamiento combinado de los sistemas metabólico, cardiorrespiratorio, biomecánico y neuromuscular durante la carrera.

La RE se puede mejorar, por lo tanto, tiene importancia para entrenadores y deportistas.

Punto de inflexión de lactato

Un umbral, o punto de inflexión, es un nivel o punto en el que algo comienza a cambiar o a suceder. Por ejemplo, el umbral del dolor es el punto en el que una persona comienza a sentir dolor. Los umbrales tienen una importancia histórica para la humanidad. Por ejemplo, muchos historiadores consideran que el surgimiento de la agricultura fue un umbral clave en la configuración de la especie humana y de nuestro mundo.

El ácido láctico ha desempeñado un papel importante en la teoría tradicional de la fatiga muscular y la limitación del rendimiento en ejercicios de resistencia. Se pensaba que una vez que la intensidad del ejercicio supera la tasa de consumo máximo de oxígeno ($\text{VO}_{2\text{máx}}$), se produce una "deuda de oxígeno" y el metabolismo pasa de aeróbico a anaeróbico, lo que conduce a un aumento abrupto de los niveles de lactato en sangre. El punto de inflexión del lactato (también conocido como umbral anaeróbico o umbral de lactato) se define como el punto en el que el lactato en sangre comienza a acumularse sustancialmente por encima de las concentraciones en reposo durante el ejercicio de intensidad creciente. Por ejemplo, la Figura 21 muestra la relación entre el lactato en sangre y la velocidad de carrera.



▲ Figura 21 Relación entre la velocidad de carrera y la concentración de lactato en sangre

Se creía que el aumento de la concentración de lactato en sangre afectaba la contractilidad muscular y provocaba fatiga y agotamiento. Se creía que las sensaciones incómodas en los músculos que trabajaban a estos esfuerzos casi máximos estaban directamente asociadas con este aumento de la producción de ácido láctico (que excedía la depuración de ácido láctico), al igual que el dolor muscular de aparición tardía que se desarrollaba durante los días posteriores. Por lo tanto, se creía que el ácido láctico era poco más que un producto de desecho metabólico. Sin embargo, el pensamiento científico ha evolucionado hacia nuevos conocimientos sobre el papel del lactato en el metabolismo energético.

Las ideas respaldadas por investigaciones más recientes, como el umbral de potencia crítica (PC), podrían predecir con mayor precisión la duración tolerable del ejercicio de alta intensidad que precede a la fatiga/agotamiento/interrupción del ejercicio. La potencia crítica es una medida de la potencia máxima que una persona puede mantener durante un período prolongado sin fatigarse/agotarse. Esto ha llevado a algunos a sugerir:

En la actualidad, cuando es posible que un individuo realice ejercicio agotador de alta intensidad, la potencia/velocidad críticas ofrecen, tal vez, el mayor potencial para predecir el rendimiento atlético, evaluar clínicamente la función fisiológica del paciente/saludable y monitorear la eficacia del entrenamiento.

Poole y cols. (2021)

idades de pensamiento

Existe una relación negativa entre la potencia de salida y el tiempo durante el cual se puede mantener. Esta es una característica fundamental del rendimiento en ejercicios de alta intensidad.

Tu CP es el poder que puedes mantener durante un tiempo determinado. Puede ser el poder que puedes mantener durante 20 minutos (CP20), 45 minutos (CP45) o 60 minutos (CP60).

CP60 tiene menor potencia que CP45, y CP45 es menor que CP20. En otras palabras, puedes durar menos tiempo con mayor potencia.

En general, el ejercicio como correr, andar en bicicleta o nadar por encima del umbral crítico de potencia produce una resistencia muy pequeña. Por el contrario, el ejercicio por debajo del umbral crítico de potencia permite una resistencia mucho mayor.

Tradicionalmente, el modelo CP se ha utilizado para obtener información sobre las respuestas fisiológicas, los mecanismos de fatiga y el rendimiento durante el ejercicio continuo de potencia constante. Sin embargo, en los últimos años, el concepto CP se ha ampliado mediante su aplicación al ejercicio intermitente de alta intensidad. Por ejemplo, los deportes de equipo populares (como el fútbol, el hockey o el baloncesto) se caracterizan por ráfagas frecuentes de ejercicio de intensidad severa intercaladas con períodos de recuperación de menor intensidad. En la actualidad, los científicos del deporte aplicado utilizan el modelo CP para comprender mejor las limitaciones del rendimiento en dichos deportes e informar sobre las tácticas de competición y las prácticas de entrenamiento.

Punto clave

El punto de inflexión del lactato se expresa generalmente como el porcentaje del consumo máximo de oxígeno ($\% \text{VO}_{2\text{max}}$) en el que se produce. En individuos no entrenados, esto ocurrirá en un porcentaje menor de su $\text{VO}_{2\text{max}}$ (aproximadamente el 50%–60% del $\text{VO}_{2\text{max}}$) en comparación con los atletas de resistencia de élite (alrededor del 70%–80% de su $\text{VO}_{2\text{max}}$); puede ser incluso mayor en algunos atletas de élite. Por lo general, en dos atletas con el mismo $\text{VO}_{2\text{max}}$, el atleta con el punto de inflexión del lactato más alto suele tener el mejor rendimiento de resistencia, pero no olvide que otros factores también pueden contribuir, como la economía de carrera.



▲ Figura 22 El ciclismo de ruta es un evento de resistencia que requiere alta potencia durante un período de tiempo sostenido.



▲ Figura 23 El baloncesto se caracteriza por ráfagas frecuentes de ejercicio de intensidad severa intercaladas con períodos de recuperación de menor intensidad.



Pregunta de enlace

¿Cómo podría el ejercicio en condiciones de calor y humedad durante períodos prolongados de tiempo influir en el sistema de energía predominante utilizado y en el punto de inflexión del lactato? (A.1.2)

Considerar:

- los tres principales sistemas energéticos utilizados durante el ejercicio
- mantener una temperatura central segura
- demanda de energía y agotamiento de las reservas de glucógeno
- fosforilación oxidativa y glucólisis
- la intensidad del ejercicio y el punto de inflexión del lactato
- Estrategia de hidratación, nutrición y ritmo.



▲ Figura 24 Participación en un maratón en condiciones cálidas y húmedas



Pregunta de enlace

¿Existe una relación entre la fortaleza mental y el punto de inflexión del lactato? (C.1.2)

Considerar:

- capacidad para tolerar el ejercicio de alta intensidad
- capacidad de tolerar la incomodidad
- capacidad para regular las emociones
- cómo la genética, el estado de entrenamiento y la nutrición pueden influir en el punto de inflexión del lactato.



▲ Figura 25 Atleta exhausto

Déficit de oxígeno y consumo excesivo de oxígeno después del ejercicio La dificultad

para completar un ejercicio intenso nos deja

con una sensación de fatiga posterior. Incluso en reposo seguimos respirando con dificultad durante algún tiempo. Cuando el ejercicio comienza de forma abrupta, la demanda de ATP es inmediata.

Inicialmente se satisface con las reservas de ATP, seguidas rápidamente por la PCr y el sistema glucolítico. Estos sistemas energéticos se activan más rápidamente que el sistema energético aeróbico, que tarda más en reaccionar.

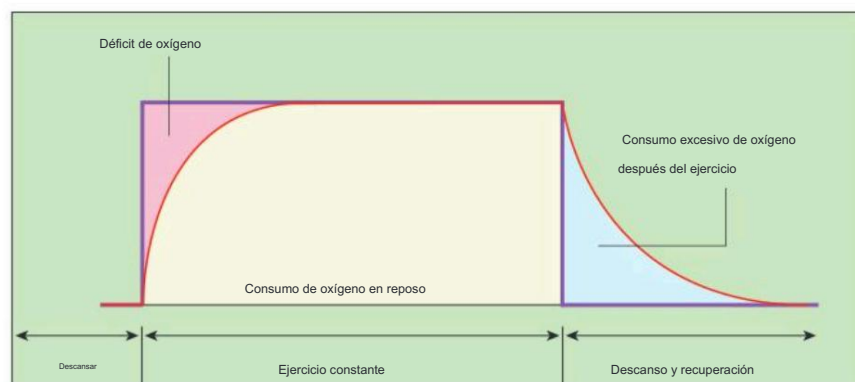
El cuerpo necesita oxígeno desde el momento en que comienza a hacer ejercicio. El cuerpo entra en un déficit de oxígeno porque la necesidad de oxígeno y el suministro de oxígeno no coinciden en el primer momento del ejercicio. Durante la recuperación del ejercicio, el uso de oxígeno continúa a un ritmo mayor que el necesario en reposo. Esto se conoce como consumo excesivo de oxígeno después del ejercicio (EPOC). Parte de esto es compensar las consecuencias del metabolismo anaeróbico durante la fase inicial del ejercicio. Sin embargo, persisten demandas adicionales de oxígeno durante la recuperación, para procesos como la restauración de la oxigenación de los tejidos y la mioglobina, el costo de la respiración que permanece elevado y toda una serie de otros factores fisiológicos que mantienen elevado el metabolismo incluso cuando el ejercicio ha cesado.

La reparación tisular post-ejercicio, que es una de las bases de la respuesta al entrenamiento, también tiene un costo energético. La Figura 26 muestra cómo el costo de ATP y el uso de oxígeno resultan en un déficit de oxígeno al inicio del ejercicio y una recuperación de EPOC después del ejercicio.

Tradicionalmente, se ha descrito que el EPOC tiene dos componentes: un componente rápido inicial y un componente lento secundario.

El componente rápido de la curva representaba el oxígeno necesario para reconstruir el ATP y la PCr utilizados durante las etapas iniciales del ejercicio. Como no había suficiente oxígeno disponible, los enlaces de fosfato de alta energía se rompían para proporcionar la energía necesaria. Durante la recuperación, estos enlaces debían volver a formarse, a través de procesos oxidativos, para reponer las reservas de energía o saldar la deuda de oxígeno. Se pensaba que el componente lento de la curva era el resultado de la eliminación del lactato acumulado en el tejido muscular, ya sea por conversión a glucógeno o por oxidación a CO_2 y H_2O , para proporcionar la energía necesaria para restaurar las reservas de glucógeno.

Más recientemente, los investigadores han cuestionado esta explicación de dos componentes. El EPOC depende de más factores que la reposición de ATP y PCr, y la eliminación del lactato producido por el metabolismo anaeróbico. Por ejemplo, durante la fase inicial del ejercicio se utiliza algo de oxígeno de la hemoglobina y la mioglobina, que también debe reemplazarse durante la recuperación temprana. Además, después del ejercicio, la respiración permanece temporalmente elevada para ayudar a eliminar el dióxido de carbono, y la temperatura corporal está elevada, lo que mantiene altas las tasas metabólicas y respiratorias y esto requiere más oxígeno.



— Costo del ATP

— Uso de oxígeno ▲

Figura 26 Déficit de oxígeno y EPOC

Punto clave

Debido a que las necesidades y el suministro de oxígeno difieren durante la transición del reposo al ejercicio, el cuerpo experimenta un déficit de oxígeno. Durante los primeros minutos de recuperación al final del ejercicio, el consumo de oxígeno permanece elevado temporalmente. Existen varias razones para esto, entre ellas:

- Se requiere oxígeno para reconstruir las reservas de ATP y PCr.
- durante la fase inicial del ejercicio se toma prestado algo de oxígeno hemoglobina y mioglobina, y que el oxígeno debe reponerse
- la respiración permanece elevada para ayudar a “eliminar” cualquier exceso de dióxido de carbono que se ha acumulado en los tejidos durante el ejercicio
- la participación en ejercicio eleva la temperatura corporal y hay un gasto de oxígeno para ayudar a enfriar el cuerpo (a través del aumento de la frecuencia respiratoria, por ejemplo).

Preguntas de práctica

1. En baloncesto, los equipos tienen que lanzar dentro de los 24 segundos posteriores a la obtención de la posesión del balón. Describa los dos sistemas utilizados para producir ATP durante un período de posesión breve e intenso. (4 puntos)
2. Al finalizar la carrera de 200 m combinado individual, un nadador respira con dificultad durante el período de recuperación. Explique los factores que influyen en la respiración acelerada del nadador después de la carrera. (5 puntos)

Resumen

- Nuestro cuerpo depende del suministro de energía de los alimentos que se convierten en ATP en vías bioquímicas.
- El metabolismo descompone moléculas grandes (catabolismo) para liberar energía o sintetiza moléculas más grandes a partir de otras más pequeñas (anabolismo) para almacenar energía.
- La energía proveniente de los carbohidratos se puede almacenar en forma de glucógeno en el hígado y los músculos esqueléticos. La energía proveniente de las grasas se puede almacenar en forma de triglicéridos en el tejido adiposo y los músculos esqueléticos.
- La contracción muscular es un proceso importante que requiere energía. Se recurre a diferentes sistemas energéticos para obtener energía en forma de ATP.
- Los sistemas energéticos anaeróbicos son el sistema de los fosfágenos y el sistema glucolítico, que proporcionan energía rápidamente durante un corto periodo de tiempo. Los sistemas aeróbicos son los sistemas oxidativos de la glucosa y las grasas, que hacen que la energía esté disponible durante un largo periodo de tiempo después de un inicio tardío.
- En las fibras musculares, el rendimiento de los sistemas energéticos influye en la contracción del músculo; esto a su vez puede influir en nuestra capacidad para realizar diferentes tipos de ejercicio.
- El $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$ ha sido un "estándar de oro" internacional para evaluar la función cardiovascular-respiratoria.
- El $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$ se puede mejorar mediante el entrenamiento.
- El consumo de oxígeno en estado estable a una velocidad de carrera determinada se conoce como economía de carrera.
- El punto de inflexión del lactato (umbral anaeróbico/umbral de lactato) se define como el punto en el que el lactato en sangre comienza a acumularse sustancialmente por encima de las concentraciones en reposo durante el ejercicio de intensidad creciente.
- La potencia crítica es una medida de la potencia máxima producción que una persona puede mantener durante un período prolongado de tiempo sin fatigarse o agotarse.
- EPOC es el período de recuperación del ejercicio durante el que la utilización de oxígeno continúa a un ritmo mayor que el necesario en reposo.

Comprueba tu comprensión

Después de leer este capítulo, usted debería poder:

- comprender el metabolismo de los carbohidratos y las grasas
- describir las vías metabólicas del metabolismo de carbohidratos y grasas
- explicar el papel de la insulina, el glucagón y la epinefrina en el metabolismo de los carbohidratos y las grasas
- explicar el papel de la insulina y la contracción muscular en la captación de glucosa durante el ejercicio
- reproducir la ultraestructura de una mitocondria
- definir el término respiración celular
- describir las vías metabólicas que suministran energía
- explicar el papel del ATP en la contracción muscular
- discutir las características de los sistemas energéticos y su contribución durante el ejercicio
- evaluar las contribuciones de los sistemas energéticos Durante diferentes tipos de ejercicio
- explicar la economía de carrera
- describir cómo el $\dot{V} \cdot O_2\text{max}$ puede verse influenciado por la edad y el sexo y estado de formación
- discutir el punto de inflexión del lactato
- explicar los fenómenos del déficit de oxígeno y el consumo excesivo de oxígeno después del ejercicio (EPOC).

Preguntas de autoaprendizaje

1. Indique el principal sistema energético utilizado para proporcionar energía en reposo.
2. Compare las contribuciones relativas de las vías para la producción de ATP:
 - a. en ejercicios intensos de corta duración (por ejemplo, un sprint de 100 m)
 - b. durante un trote constante de baja intensidad de 30 minutos.
3. Describe qué es la economía de carrera y su relación con el rendimiento deportivo.
4. Analice cómo la comprensión del punto de inflexión del lactato puede ayudar a un entrenador a planificar un entrenamiento. sesión.
5. Explique el concepto de EPOC.



Pregunta basada en datos

Utilizando un diseño aleatorio cruzado, un estudio (Schaun et al., 2018) comparó el gasto energético de 11 mujeres sanas y físicamente activas (rango de edad de 18 a 35 años), durante y después de dos protocolos de aeróbicos acuáticos: entrenamiento en intervalos de alta intensidad (HIIT) y entrenamiento continuo moderado (CONT).

El HIIT consistió en ocho series de 20 segundos al 130% de la cadencia asociada con el $\dot{V}O_{2\text{máx}}$, con descansos pasivos de 10 segundos entre series, y el CONT fue de 30 minutos al 70% de la frecuencia cardíaca máxima.

La media (\pm DE) de $\dot{V} \cdot O_2$, el gasto energético (EE) durante el ejercicio y el EPOC durante 30 minutos posteriores al ejercicio se muestran en la Tabla 2.

▼ Tabla 2

	CONTINUACIÓN	
$\dot{V} \cdot O_2$ medio durante el ejercicio (l min ⁻¹)	1,56 (\pm 0,2)	1,98 (\pm 0,2)
EE media durante el ejercicio (kcal min ⁻¹)	7,6 (\pm 1,1)	10,0 (\pm 1,1)
EPOC durante 30 minutos de descanso posterior al ejercicio (l)	4,6 (\pm 1,7)	4,2 (\pm 1,0)

1. Identifique qué protocolo tuvo el mayor gasto de energía por minuto durante el ejercicio. (1 punto)
2. Calcule la diferencia en $\dot{V} \cdot O_2$ (l min⁻¹) durante el ejercicio entre los dos protocolos. (1 punto)
3. Explique la diferencia en los valores medios y desviaciones estándar encontrados para EPOC. (3 puntos)