

# Módulo 3. Metabolismo energético y rendimiento deportivo

## Unidad 1. Sistemas energéticos en el ejercicio

### Introducción

El rendimiento deportivo y la capacidad para mantener un esfuerzo físico dependen, en gran medida, de la habilidad del organismo para generar y suministrar energía a los músculos en acción. A lo largo de la evolución, el cuerpo humano ha desarrollado distintos sistemas o vías bioquímicas para producir la energía necesaria (en forma de ATP, trifosfato de adenosina) y afrontar actividades de diversa intensidad y duración. Estos sistemas se activan en mayor o menor medida según el tipo de ejercicio, la potencia requerida y la disponibilidad de oxígeno.

En el deporte, entender los sistemas energéticos resulta esencial para planificar entrenamientos, diseñar estrategias de competición y optimizar la recuperación. El objetivo de este bloque es describir las principales vías energéticas —el sistema ATP-PC (o fosfágeno), la glucólisis anaeróbica y el sistema oxidativo aeróbico—, así como aclarar el papel que cada una desempeña según la intensidad y la duración de la actividad física.

### Sistemas energéticos durante el ejercicio (aeróbico y anaeróbico)

#### Descripción de los sistemas ATP-PC, glucólisis y oxidativo

A continuación, se describen los tres principales sistemas energéticos que el organismo utiliza para generar ATP durante el ejercicio: el sistema ATP-PC, la glucólisis anaeróbica y el sistema oxidativo aeróbico. Cada uno de estos sistemas tiene características específicas en cuanto a su capacidad, rapidez y condiciones de activación, lo que determina su papel predominante según la intensidad y duración de la actividad física.

- **Sistema ATP-PC (o sistema de fosfágenos)**

El sistema ATP-PC, también conocido como sistema de fosfágenos, es la vía energética más inmediata y de mayor potencia. Está diseñado para suministrar energía rápidamente en esfuerzos intensos, explosivos y de corta duración, aproximadamente entre seis y diez segundos. El ATP almacenado en el músculo esquelético es muy limitado y solo puede cubrir un esfuerzo máximo de un par de segundos. Para extender la disponibilidad de energía explosiva, el músculo utiliza fosfocreatina (PCr), una molécula que, al descomponerse, dona su grupo fosfato

para regenerar ATP de manera casi instantánea. Esta reacción es catalizada por la enzima creatina quinasa, que transfiere el fosfato de la PCr al ADP, produciendo nuevamente ATP listo para usarse y creatina libre.

Una de las características principales de este sistema es que produce energía sin necesidad de oxígeno, es decir, funciona de manera anaeróbica, y genera muy pocos subproductos metabólicos como el lactato. Por eso, el sistema ATP-PC es la vía prioritaria en esfuerzos máximos muy breves, como un *sprint* de 60 metros, un levantamiento de pesas a una repetición máxima o un saque explosivo en tenis. Sin embargo, la cantidad de PCr en el músculo es limitada y, una vez agotada tras esos seis a diez segundos de esfuerzo máximo, el rendimiento explosivo cae abruptamente si no se reduce la intensidad o se permite un breve periodo de recuperación para reconstituir las reservas de fosfágenos.

La recuperación de los depósitos de PCr ocurre principalmente en condiciones de reposo o baja intensidad, utilizando la energía aeróbica para fosforilar nuevamente la creatina. En aproximadamente dos a tres minutos de pausa se recupera una porción significativa de la PCr agotada, aunque para una recuperación total se requieren entre cinco y ocho minutos.

- **Sistema glucolítico (glucólisis anaeróbica)**

Cuando la actividad física se extiende más allá de los primeros segundos o la intensidad sigue siendo elevada, aunque no tan explosiva como para mantenerse exclusivamente con el sistema ATP-PC, el músculo recurre en mayor medida a la glucólisis anaeróbica. Esta vía utiliza principalmente la glucosa presente en la sangre o el glucógeno almacenado en el músculo como fuente de combustible. La glucólisis es un proceso enzimático mediante el cual la glucosa o el glucógeno se descomponen, generando ATP y produciendo piruvato como producto intermedio.

En condiciones de alta demanda energética, el oxígeno disponible es insuficiente para procesar todo el piruvato mediante vías aeróbicas, por lo que gran parte de este se convierte en lactato gracias a la acción de la enzima lactato deshidrogenasa. La glucólisis anaeróbica produce ATP a una velocidad alta, aunque menor que la del sistema ATP-PC, y puede sostener esfuerzos intensos durante un periodo corto a moderado, aproximadamente entre 30 segundos y 2 minutos. Ejemplos de actividades que dependen de este sistema son un *sprint* de 400 metros, series de repeticiones con pesos moderados y esfuerzos de alta intensidad en deportes de equipo, como intervalos de un minuto.

Durante este proceso, la acumulación de lactato y de iones hidrógeno (H+) contribuye a la acidificación muscular, generando fatiga y sensación de ardor, lo que puede limitar la continuidad del esfuerzo a intensidades elevadas. No obstante, el lactato no es únicamente un producto de desecho, ya que puede ser reutilizado como fuente de energía en el corazón y en fibras musculares más oxidativas, o incluso reconvertido en glucosa en el hígado a través del ciclo de Cori.

La glucólisis anaeróbica es especialmente relevante en numerosas disciplinas que requieren esfuerzos repetidos de alta intensidad. Por ejemplo, en deportes de equipo como el fútbol, baloncesto u hockey, donde se realizan carreras cortas e intensas, cambios de ritmo y esfuerzos intermitentes, este sistema energético desempeña un papel destacado.

- **Sistema oxidativo (metabolismo aeróbico)**

El sistema oxidativo, también conocido como sistema aeróbico, es la vía más eficiente para la producción de ATP a partir de los nutrientes, incluyendo carbohidratos, grasas e incluso proteínas en casos de necesidad. Su base fundamental es el uso del oxígeno para la fosforilación oxidativa en las mitocondrias. El piruvato derivado de la glucólisis, cuando hay suficiente oxígeno disponible, ingresa al ciclo de Krebs, donde se oxida completamente, liberando dióxido de carbono y electrones que, mediante la cadena de transporte de electrones, generan una gran cantidad de ATP.

Los sustratos utilizados por este sistema varían según la intensidad y duración del ejercicio. En intensidades moderadas y altas, el principal combustible aeróbico proviene del glucógeno muscular y la glucosa sanguínea. En esfuerzos de baja o moderada intensidad y más prolongados, los ácidos grasos libres se convierten en la fuente dominante de energía. En presencia de oxígeno, los triglicéridos almacenados en el tejido adiposo y en el músculo se hidrolizan en ácidos grasos y glicerol, que luego entran a la mitocondria para su oxidación mediante el proceso conocido como  $\beta$ -oxidación. Por último, las proteínas no suelen emplearse como sustrato principal, salvo en condiciones extremas como el ayuno prolongado o entrenamientos muy exhaustivos sin reposición adecuada de carbohidratos.

Aunque la velocidad de producción de ATP en este sistema es más lenta que en las vías anaeróbicas, debido a la complejidad de los múltiples pasos enzimáticos y la dependencia del oxígeno, su capacidad para generar ATP es mucho mayor en términos cuantitativos. Esto le permite sostener esfuerzos de larga duración.

El sistema oxidativo es predominante en pruebas de resistencia de media y larga duración, como carreras de 5.000 metros, maratones, triatlones, ciclismo de ruta y natación de distancia. Además, desempeña un papel clave en la recuperación activa entre esfuerzos intensos, encargándose de reconstituir los fosfágenos y eliminar o reutilizar el lactato circulante.

### **Papel de cada sistema según la intensidad y duración del ejercicio**

Un aspecto fundamental en el estudio de los sistemas energéticos es entender que todos ellos se activan simultáneamente, aunque en diferente proporción. No existen «compartimentos» aislados que funcionen por separado; más bien, los sistemas

interactúan y se solapan constantemente. Sin embargo, según la intensidad y la duración del esfuerzo, uno de estos sistemas prevalece y se convierte en la principal fuente de energía.

- **Intervalo de 0 a 10 segundos: dominio del sistema ATP-PC**

En los primeros segundos de un ejercicio muy intenso, que puede alcanzar entre el 90 y el 100 % de la capacidad máxima, el músculo utiliza preferentemente el ATP almacenado y la fosfocreatina (PCr). Un ejemplo claro de este tipo de esfuerzo es un *sprint* de 100 metros lisos o un levantamiento de potencia máxima en halterofilia.

Estas actividades se caracterizan por su explosividad, ya que requieren una fuerza máxima o una velocidad muy alta. Además, su duración es muy corta, dado que la fatiga aparece rápidamente debido a las limitadas reservas de fosfágenos. Por último, la capacidad para repetir esfuerzos con la misma intensidad depende en gran medida de la recuperación; se necesitan pausas suficientes que permitan la resíntesis de ATP y PCr, generalmente entre 2 y 5 minutos, según la magnitud del esfuerzo y el objetivo del entrenamiento.

- **Intervalo de 10 segundos a 2 minutos: predominio de la glucólisis anaeróbica**

Cuando el ejercicio se extiende más allá de los 10 a 15 segundos y la intensidad sigue siendo elevada, el sistema ATP-PC no es suficiente para mantener la demanda energética. En ese momento, la glucólisis anaeróbica toma protagonismo y se activa con mayor fuerza.

Ejemplos de esfuerzos que dependen principalmente de esta vía incluyen carreras de 200 a 400 metros en atletismo, pruebas contrarreloj de un kilómetro en ciclismo de pista y series intensas de repeticiones en el gimnasio, como 8 a 12 repeticiones con pesos relativamente altos.

A medida que el esfuerzo intenso se prolonga, aumenta la producción de lactato y la acidificación muscular, lo que limita la continuidad del ejercicio. Por eso, en deportes interválicos es fundamental planificar pausas o ejercicios de menor intensidad que permitan la recuperación parcial.

Los entrenamientos específicos para mejorar la tolerancia al lactato y la capacidad para realizar esfuerzos repetidos de alta intensidad suelen incluir trabajos interválicos, *sprints* de 30 a 60 segundos, circuitos o repeticiones con descansos incompletos. Estas prácticas ayudan al cuerpo a mejorar su capacidad para amortiguar y reutilizar el lactato, optimizando el rendimiento.

- **Intervalo de 2 minutos en adelante: crecimiento progresivo del metabolismo oxidativo**

A medida que el esfuerzo supera los dos o tres minutos, la vía oxidativa adquiere un papel cada vez más importante. Cuando la intensidad es moderada y la actividad se extiende durante varios minutos u horas, el sistema aeróbico se convierte en la fuente predominante de energía.

Este sistema es fundamental en **ejercicios prolongados** como carreras de media y larga distancia, ciclismo, remo, natación de fondo y carreras de montaña. Incluso en deportes de equipo, como el fútbol o el baloncesto, donde los esfuerzos intensos son intermitentes, una base sólida de resistencia aeróbica es crucial para mantener la repetición de esfuerzos explosivos a lo largo del partido.

En **ejercicios con intensidad creciente**, se distinguen dos umbrales: el primer umbral, conocido como umbral aeróbico, donde la contribución aeróbica es mayoritaria, y el segundo umbral, o umbral anaeróbico, por encima del cual la producción de lactato se incrementa notablemente y el metabolismo anaeróbico gana relevancia. La ubicación de estos umbrales varía según el nivel de entrenamiento y factores genéticos.

Un indicador clave de la capacidad aeróbica máxima es el consumo máximo de oxígeno, o VO<sub>2</sub> máx. Cuanto mayor es el VO<sub>2</sub> máx., mayor es la capacidad de aportar oxígeno a los músculos y, por ende, más prolongada puede ser la actividad a alta intensidad. Entrenar cerca o por encima del umbral anaeróbico contribuye a aumentar la potencia aeróbica y a mejorar la eficiencia en la utilización de los combustibles energéticos.

### **Interacción de sistemas en esfuerzos intermitentes y mixtos**

En muchos deportes, la **intensidad y la duración** del ejercicio no son uniformes: se alternan picos explosivos con fases de menor demanda, pausas activas o momentos tácticos. En estas situaciones, la **sinergia** entre sistemas es evidente:

- Al iniciar una acción explosiva (*sprintar* tras un balón), se recurre al **sistema ATP-PC**.
- Si la jugada se alarga o se repite en pocos segundos, aumentan la **glucólisis anaeróbica** y, tras la finalización de la acción, el **sistema aeróbico** ayuda a recuperar los fosfágenos y a oxidar lactato durante la fase de menor intensidad.

El condicionamiento aeróbico actúa como un soporte global, permitiendo una rápida recuperación durante los descansos breves para poder realizar repetidos *sprints* sin que la fatiga se torne excesiva. Por esta razón, incluso en deportes considerados explosivos como el fútbol o el baloncesto, contar con una buena base aeróbica es un factor determinante para el rendimiento.

## Aplicaciones prácticas en el entrenamiento y la planificación

Según el objetivo deportivo y la modalidad de ejercicio, se pueden aplicar distintas estrategias que prioricen uno u otro sistema, optimizando así la mejora del rendimiento y la prevención de la fatiga y lesiones. A continuación, se describen las principales aplicaciones prácticas en distintos tipos de entrenamiento.

- **Entrenamiento de fuerza explosiva y potencia**
  - Predominio del **sistema ATP-PC**.
  - Empleo de **series muy cortas** (1 a 5 repeticiones), con cargas elevadas o alta velocidad de ejecución.
  - Descansos completos para permitir la resíntesis de PCr.
  - Mejoras en la potencia máxima y en la capacidad de generar fuerza de forma instantánea.
- **Entrenamiento de velocidad y tolerancia láctica:**
  - Sobrecarga del **sistema glucolítico**.
  - Series o intervalos de 30 a 90 segundos a intensidad próxima al máximo, provocando acumulación de lactato.
  - Descansos parciales para promover adaptaciones en la capacidad de amortiguar la acidez y prolongar la duración del esfuerzo intenso.
  - Adecuado en pruebas de 400-800 metros, o disciplinas de equipo con repeticiones de *sprints*.
- **Entrenamiento aeróbico extensivo**
  - Desarrollo del sistema oxidativo.
  - Sesiones de larga duración a intensidades moderadas (60-75 % del VO<sub>2</sub> máx. o un nivel de RPE moderado).
  - Favorece la **capilarización muscular**, el incremento de mitocondrias y la optimización de la oxidación de grasas.
  - Fundamental en deportes de resistencia como el maratón, el ciclismo de fondo o la natación de larga distancia.
- **Entrenamiento de umbral**
  - Trabajo cercano al **umbral anaeróbico** (85-90 % del VO<sub>2</sub> máx., según el nivel), para mejorar la capacidad de sostener esfuerzos intensos sin acumular lactato en exceso.

- Series más largas (3-10 minutos) con breves descansos, o esfuerzo continuo a ritmo estable.
- Incrementa la **tolerancia al lactato**, retrasa la fatiga y mejora la eficiencia cardiovascular.
- **Entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT)**
  - Alterna **picos de esfuerzo muy intenso** (que involucran ATP-PC y glucólisis) con breves descansos o esfuerzos ligeros (mayor componente aeróbico).
  - Permite la mejora simultánea de la potencia aeróbica y la capacidad anaeróbica.
  - Muy utilizado en programas de acondicionamiento general, deportes de resistencia y también en ámbitos recreativos por su eficiencia en tiempo y adaptaciones metabólicas.

### Factores que condicionan la predominancia de un sistema energético

A continuación, se presentan los principales factores que modulan la contribución relativa de cada sistema energético.

- **Intensidad relativa del ejercicio:** a mayor intensidad, mayor componente anaeróbico (ATP-PC y glucólisis).
- **Duración:** cuanto más se prolonga el esfuerzo, más relevante es el metabolismo oxidativo (aeróbico).
- **Estado de entrenamiento:** atletas con mejor resistencia aeróbica pueden posponer el uso masivo de la glucólisis anaeróbica, retrasando la fatiga. Quienes entrenan fuerza explosiva desarrollan mayores reservas y tasas de resíntesis de ATP a partir de PCr.
- **Disponibilidad de nutrientes:** la depleción de glucógeno limita la glucólisis tanto aeróbica como anaeróbica. Una dieta adecuada y la disponibilidad de carbohidratos influyen en la duración de esfuerzos intensos. De igual forma, la aptitud para oxidar grasas afecta la capacidad de sostener esfuerzos aeróbicos prolongados.
- **Condiciones ambientales:** altas temperaturas, humedad, altitud o hidratación deficiente pueden afectar la capacidad de transporte de oxígeno y la producción de energía, alterando la contribución de cada sistema.

### Conclusiones

Los **sistemas energéticos** —ATP-PC, glucólisis y oxidativo— constituyen la base del rendimiento físico y explican la capacidad del organismo para responder a esfuerzos de distinta índole. Cada sistema participa simultáneamente en todo momento, aunque sus porcentajes de contribución varían según la **intensidad**, la **duración** y las **características del atleta**.

- El **sistema ATP-PC** lidera en esfuerzos cortos y explosivos (0-10 segundos), posibilitando la máxima potencia pero con reservas muy limitadas.
- La **glucólisis anaeróbica** adquiere un rol predominante en actividades intensas que se extienden hasta cerca de 1-2 minutos, generando lactato y contribuyendo a la fatiga muscular.
- El **sistema aeróbico (oxidativo)** es la vía más resistente y se convierte en principal fuente de ATP en ejercicios de media y larga duración, utilizando carbohidratos y grasas de forma más eficiente, aunque a una tasa de producción de energía menor.

En la práctica, **todos los deportistas** combinan estas vías en función de las exigencias de sus disciplinas. El conocimiento de cómo y cuándo se activa cada sistema permite diseñar **planes de entrenamiento específicos**, optimizar la **nutrición deportiva**, periodizar adecuadamente la carga y la recuperación, y desarrollar al máximo el potencial de cada atleta. De esta forma, la fisiología del metabolismo energético se convierte en una herramienta imprescindible para el rendimiento y la salud en la práctica deportiva, desde el nivel aficionado hasta la alta competencia.

## Transición entre sistemas energéticos

A lo largo de una sesión de ejercicio, el organismo no recurre de manera exclusiva y absoluta a un único sistema de producción de energía. En realidad, los sistemas energéticos —ATP-PC, glucólisis anaeróbica y metabolismo aeróbico— operan simultáneamente, aunque uno de ellos predomine según la intensidad, la duración del esfuerzo y el estado fisiológico de la persona. Este fenómeno se conoce como transición entre sistemas energéticos y es esencial comprenderlo para diseñar entrenamientos más eficaces, prevenir la fatiga prematura y optimizar la recuperación.

### ¿Cómo el cuerpo cambia entre sistemas durante el ejercicio?

Durante el ejercicio, el organismo no depende exclusivamente de un solo sistema energético, sino que realiza una transición dinámica entre ellos para satisfacer las demandas de energía según la intensidad y duración del esfuerzo. Esta adaptación permite maximizar el rendimiento y retrasar la fatiga, utilizando cada sistema en el momento más adecuado. A continuación, se describen las fases principales de esta transición metabólica durante la actividad física.

- **Inicio de la actividad: sistema ATP-PC**

En los **primeros segundos** de ejercicio muy intenso o explosivo (alrededor de 6 a 10 segundos), el músculo se basa casi por completo en el **sistema ATP-PC** (fosfágenos). Durante este breve lapso:

- el **ATP** almacenado en el músculo provee la energía inmediata;
- la **fosfocreatina (PCr)** regenera ATP rápidamente a partir del ADP.

El cuerpo favorece este sistema cuando la demanda de potencia es muy alta y el tiempo es demasiado corto para que entren en juego otras rutas de producción de energía. Ejemplos claros son los **sprints máximos** (de 60-100 metros), los **levantamientos de potencia máxima** (1 repetición) o movimientos muy explosivos en deportes como baloncesto (saltos) o tenis (saques potentes).

- **Pasaje a la glucólisis anaeróbica**

Si el esfuerzo se prolonga más allá de 10-15 segundos y continúa siendo de **intensidad elevada**, las reservas de ATP y PCr comienzan a agotarse o dejan de ser suficientes para mantener la misma potencia. Entonces, el organismo **incrementa la glucólisis anaeróbica** como ruta principal.

- Se emplea **glucosa** (en sangre) o **glucógeno** (almacenado en el músculo) como sustrato.
- Debido a la alta demanda de energía y la insuficiente provisión de oxígeno, buena parte del piruvato generado en la glucólisis se transforma en **lactato**.
- Esta vía puede sostener la intensidad del ejercicio durante unos **30 segundos a 2 minutos**, dependiendo del nivel de entrenamiento y la tolerancia al lactato.

En deportes como las carreras de 400 a 800 metros en atletismo, las repeticiones intensas en el gimnasio o algunas acciones intermitentes en deportes de equipo, la glucólisis anaeróbica se convierte en la principal fuente de ATP tras la fase inicial dominada por el sistema ATP-PC.

- **Predominio del metabolismo aeróbico**

A medida que el ejercicio **se prolonga** más allá de los 2-3 minutos, especialmente si la intensidad es **moderada** o existe una combinación de esfuerzos con fases de menor intensidad, el **sistema oxidativo** (aeróbico) cobra mayor relevancia.

- Las células musculares disponen de oxígeno suficiente para procesar el piruvato en la mitocondria (ciclo de Krebs y cadena de transporte de electrones).
- Se produce ATP de manera más lenta, pero **más eficiente** en términos de cantidad total de energía obtenida.



- La **oxidación de grasas** también se vuelve muy significativa si la intensidad no es extremadamente alta o si la duración se extiende (ej. pruebas de resistencia, maratones, triatlón, ciclismo de ruta).

En este punto, aunque la glucólisis anaeróbica y el sistema ATP-PC pueden activarse en picos de intensidad (por ejemplo, un *sprint* final al terminar una carrera larga), la **base del aporte energético** se sustenta en el **consumo de oxígeno** y la capacidad aeróbica.

### **Gradualidad y solapamiento de vías**

Es importante subrayar que la transición entre sistemas energéticos no es abrupta ni ocurre en «compartimentos estancos». Desde el inicio del ejercicio, todas las vías comienzan a actuar en cierto grado; simplemente, la proporción de participación de cada una varía con el tiempo y la intensidad. Por ejemplo:

- en los primeros diez segundos, la mayor parte de la energía procede del sistema ATP-PC, aunque ya existe cierta actividad glucolítica;
- tras un minuto de esfuerzo intenso, la glucólisis anaeróbica se vuelve predominante, mientras que el ATP-PC sigue contribuyendo en menor medida y el sistema aeróbico se activa progresivamente;
- pasados varios minutos, la vía aeróbica toma el liderazgo, pero ante un aumento súbito de la intensidad, el cuerpo recurre nuevamente al aporte anaeróbico.

Este solapamiento garantiza que el músculo disponga de ATP en todo momento, ajustando su estrategia metabólica a los requerimientos inmediatos y a la disponibilidad de oxígeno.

### **Factores que afectan esta transición**

La forma en que el organismo cambia de un sistema energético predominante a otro no depende únicamente de la duración o la intensidad de la actividad. Existen múltiples factores que condicionan la rapidez y efectividad de esta transición.

- **Intensidad y tipo de ejercicio**

La intensidad relativa de la actividad es la principal variable que determina qué vía energética se activa en mayor medida. Ejercicios muy explosivos, que implican un 100 % de la potencia máxima, hacen que el atleta dependa principalmente del sistema ATP-PC. Por otro lado, a intensidades submáximas, entre el 70 y el 85 % del VO<sub>2</sub> máx., la vía aeróbica es la que tiene mayor participación.

Además, el tipo de movimiento —como correr, nadar, levantar pesas o practicar deportes intermitentes— también influye en la secuencia de activación de los

sistemas, debido a las diferentes demandas de fuerza, velocidad y resistencia que presenta cada modalidad.

- **Nivel de entrenamiento y adaptación**

Las personas con un alto nivel de resistencia aeróbica pueden demorar la dependencia excesiva de la glucólisis anaeróbica, ya que su sistema aeróbico se activa con mayor rapidez y eficiencia. Poseen un mayor número de mitocondrias, mayor densidad capilar y mejor tolerancia al lactato, lo que les permite retrasar el uso masivo de vías anaeróbicas y posponer la fatiga.

Por su parte, quienes entrenan fuerza y potencia de forma regular disponen de reservas más amplias de fosfocreatina (PCr) y pueden regenerar ATP mediante el sistema fosfágeno con mayor rapidez, manteniendo intensidades explosivas durante algunos segundos más en comparación con individuos menos entrenados.

- **Disponibilidad de oxígeno y capacidad cardiorrespiratoria**

La capacidad de aportar oxígeno a la musculatura depende del sistema cardiovascular, que incluye el gasto cardíaco y el transporte de oxígeno en la sangre, y del sistema respiratorio, que abarca la eficiencia ventilatoria y la difusión alveolar. Cuanto mayor sea la potencia aeróbica ( $\dot{V}O_2$  máx.) y el volumen de oxígeno transportado y utilizado, más rápido podrá el organismo cubrir sus necesidades energéticas por vías aeróbicas y menor será la dependencia de vías anaeróbicas que generan fatiga.

En entornos de hipoxia, como la altitud, o en situaciones de ventilación deficiente, el cuerpo experimenta una menor disponibilidad de oxígeno, lo que acelera la transición hacia la glucólisis anaeróbica.

- **Reserva de sustratos (glucógeno y PCr)**

- **Fosfocreatina (PCr):** los deportistas con entrenamientos específicos de potencia pueden acumular algo más de PCr y tienen mayor habilidad para regenerarla entre repeticiones. Esto influye en la rapidez con la que pueden repetir esfuerzos explosivos.
- **Glucógeno muscular:** si los depósitos de glucógeno están altos (gracias a una dieta adecuada), se retrasa la fatiga y se asegura un mejor rendimiento, particularmente en el tramo donde la **glucólisis y el metabolismo aeróbico de carbohidratos** son esenciales. En cambio, el agotamiento de glucógeno acelera la dependencia de las grasas, reduciendo la intensidad que se puede sostener.

- **Factores hormonales y señales metabólicas**

El cambio de un sistema energético a otro también está mediado por señales hormonales, como la adrenalina, noradrenalina, insulina, glucagón y cortisol, así como por regulaciones enzimáticas. Por ejemplo, durante el ejercicio intenso, la liberación de adrenalina estimula la glucogenólisis (descomposición de glucógeno) y la glucólisis, facilitando la producción rápida de ATP. Al mismo tiempo, el déficit de oxígeno o un elevado cociente NADH/NAD<sup>+</sup> en el músculo potencia la conversión de piruvato a lactato.

- **Tipo de fibra muscular**

En cuanto al tipo de fibra muscular, existen fibras tipo I (oxidativas o lentas) y tipo II (rápidas), subdivididas en IIa (oxidativas-glucolíticas) y IIx (más glucolíticas y potentes). Los individuos con mayor porcentaje de fibras tipo IIx tienden a destacar en esfuerzos explosivos y a utilizar intensamente los sistemas ATP-PC y glucolítico, mientras que quienes poseen una abundancia de fibras tipo I pueden mantener mejor la vía aeróbica.

### **Aplicaciones prácticas y consideraciones finales**

La comprensión detallada de los sistemas energéticos y sus características permite diseñar entrenamientos más específicos y efectivos, adaptar estrategias en competencia, optimizar la recuperación y mejorar el control del proceso de entrenamiento. A continuación, se presentan algunas aplicaciones prácticas importantes y consideraciones fundamentales para el deportista y el entrenador.

- **Diseño de entrenamientos específicos.** Para mejorar la potencia máxima o la fuerza explosiva, se realizan esfuerzos muy cortos, de entre 0 y 10 segundos, con descansos amplios. Estos entrenamientos se enfocan en el sistema ATP-PC. Para aumentar la tolerancia al lactato y mejorar la capacidad anaeróbica, se emplean intervalos de alta intensidad que duran entre 30 y 90 segundos, acompañados de pausas relativamente cortas. Por último, para desarrollar la resistencia aeróbica, se realizan sesiones de entrenamiento a intensidades moderadas y prolongadas, como rodajes extensos, o se utilizan intervalos largos cerca del umbral anaeróbico.
- **Planificación de estrategias de carrera.** Un atleta de medio fondo debe gestionar cómo inicia la prueba, posiblemente usando el sistema ATP-PC para una salida rápida, cómo mantiene un ritmo alto mediante la intervención de la glucólisis anaeróbica y el metabolismo aeróbico, y cómo realiza el *sprint* final con un nuevo impulso del sistema fosfágeno y la glucólisis anaeróbica. El conocimiento del tránsito entre sistemas energéticos permite distribuir la energía de manera más inteligente a lo largo de la competición.
- **Papel de la recuperación y la nutrición.** El descanso adecuado es fundamental para restaurar las reservas de fosfocreatina y glucógeno.

Asimismo, una dieta rica en carbohidratos, acompañada de una ingesta proteica adecuada y una hidratación óptima, favorece la transición eficiente hacia los sistemas aeróbicos y asegura un mejor aprovechamiento del glucógeno y las grasas como fuentes energéticas.

- **Control del entrenamiento.** Monitorear la frecuencia cardíaca, la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) y, en casos más avanzados, el lactato en sangre o la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC), es de gran ayuda para identificar el momento en que un atleta está entrando en la vía anaeróbica intensa o para determinar qué tan dominante es su sistema aeróbico.

## Conclusiones

La transición entre sistemas energéticos es un proceso dinámico que asegura el suministro constante de ATP durante el ejercicio. Depende principalmente de la intensidad, la duración, la disponibilidad de oxígeno, la reserva de sustratos, la genética (tipo de fibras) y el nivel de entrenamiento. Lejos de ser un cambio brusco o absoluto, cada vía metabólica colabora de forma simultánea, aunque la prioridad de cada una varíe con el paso de los segundos y minutos.

Entender esta progresión —desde la explosividad del ATP-PC, pasando por la potencia de la glucólisis anaeróbica, hasta la resistencia del metabolismo aeróbico— permite a deportistas y entrenadores diseñar planes de entrenamiento específicos, optimizar la gestión de la energía en competencia y mejorar la recuperación tras esfuerzos intensos. De esta forma, la fisiología del ejercicio aporta una base sólida para la toma de decisiones, facilitando la búsqueda de un rendimiento deportivo más alto y sostenible en el tiempo.

## Umbrales metabólicos y su relevancia en el entrenamiento

En el ámbito de la fisiología del ejercicio y el rendimiento deportivo, los umbrales metabólicos —tanto el umbral aeróbico como el umbral anaeróbico— ocupan un lugar central en la planificación del entrenamiento. Estos puntos de inflexión fisiológicos marcan la transición progresiva entre diferentes intensidades de ejercicio y permiten individualizar las cargas, optimizar la capacidad de resistencia y retrasar la fatiga. Conocer cómo se definen y cómo se determinan es fundamental para entrenadores, deportistas y profesionales que buscan diseñar programas efectivos y seguros.

### Definición de umbral anaeróbico y aeróbico

- **Umbral aeróbico**

El umbral aeróbico, también conocido como primer umbral o VT1 (primer umbral ventilatorio), representa la intensidad a la que el organismo comienza a aumentar la producción de energía a partir de la oxidación de hidratos de carbono en proporción creciente, aunque el metabolismo de las grasas sigue siendo relevante. Este umbral se asocia a un aumento moderado de la ventilación y a concentraciones de lactato en sangre que, por lo general, no superan aproximadamente los 2 mmol/L, aunque este valor puede variar entre individuos.

Las principales características del umbral aeróbico son las siguientes:

- A ritmos e intensidades cercanos al umbral aeróbico, el esfuerzo es cómodo y sostenible durante períodos prolongados. La producción de lactato es baja o estable, y el consumo de oxígeno (VO<sub>2</sub>) se mantiene muy por debajo de su máximo.
- Este umbral se considera un indicador de la capacidad aeróbica básica, ya que entrenar en esta zona favorece la capilarización muscular, el aumento del número de mitocondrias y la capacidad para oxidar ácidos grasos.

El umbral aeróbico tiene una aplicación fundamental en el entrenamiento, especialmente en sesiones de larga duración, como rodajes extensivos o entrenamientos de base. Estas actividades se realizan alrededor de este umbral para desarrollar la resistencia aeróbica, mejorar la economía de movimiento y establecer las bases necesarias para soportar intensidades más altas en el futuro. A nivel subjetivo, el deportista suele poder mantener una conversación sin dificultad excesiva, lo que se conoce como «ritmo conversacional».

### **Umbral anaeróbico**

El umbral anaeróbico, también denominado segundo umbral, umbral láctico, umbral ventilatorio 2 (VT2) o LT2, se define como la intensidad a partir de la cual la producción de lactato y la demanda energética aumentan notablemente, superando la capacidad del organismo para reutilizar o eliminar el lactato al mismo ritmo de producción. Esto genera un acúmulo creciente de lactato en sangre y, en consecuencia, una fatiga progresiva. Suele situarse alrededor de los 4 mmol/L de lactato en sangre, aunque este valor es un promedio y puede variar individualmente entre 3 y 6 mmol/L. A nivel ventilatorio, se observa un incremento más pronunciado de la frecuencia respiratoria, una sensación de esfuerzo marcadamente mayor y una disociación clara respecto a intensidades previas.

El umbral anaeróbico representa una frontera crítica en el rendimiento deportivo. Por debajo de este umbral, el deportista puede mantener un esfuerzo relativamente alto durante un tiempo considerable; sin embargo, al superarlo, la fatiga aparece rápidamente, dificultando la continuidad del ejercicio.

Se considera un indicador sólido de la capacidad de resistencia y de la aptitud para sostener ritmos de competición en eventos de media y larga duración, como

carreras de 10 km, medios maratones o pruebas de ciclismo. Mejorar el umbral anaeróbico permite mantener intensidades mayores sin acumular niveles excesivos de lactato, retrasando así la aparición de la fatiga muscular y respiratoria.

## Métodos para determinar los umbrales

La identificación precisa de los umbrales aeróbico y anaeróbico (o lactato) es clave para la **planificación individualizada** del entrenamiento, la evaluación del progreso y la definición de zonas de intensidad. Existen diversas metodologías, que pueden clasificarse en **pruebas de laboratorio** y **pruebas de campo**.

### 1. Pruebas de laboratorio

- **Prueba de esfuerzo incremental con análisis de gases y lactato**

Para llevar a cabo esta prueba, el deportista realiza un ejercicio progresivo, por ejemplo en cinta rodante o bicicleta ergométrica, donde la intensidad aumenta cada uno a tres minutos mediante incrementos de velocidad o potencia. Durante la prueba se registran el **consumo de oxígeno (VO<sub>2</sub>)**, la **producción de dióxido de carbono (VCO<sub>2</sub>)** y la **ventilación (VE)** mediante un analizador de gases; la **frecuencia cardíaca (FC)** con un monitor de pulso; y la **concentración de lactato en sangre**, obtenida a través de pequeñas punciones en el lóbulo de la oreja o el dedo, tomadas al final de cada fase.

La determinación del umbral aeróbico (VT1) se realiza identificando un cambio no lineal en la ventilación (VE/VO<sub>2</sub>) o un ligero aumento del cociente respiratorio, acompañado de concentraciones de lactato entre 2 y 2,5 mmol/L. Por su parte, el umbral anaeróbico (VT2 o LT2) se localiza donde la ventilación y la concentración de lactato muestran un incremento más pronunciado, aproximadamente en 4 mmol/L, momento en que el cuerpo depende cada vez más de la glucólisis anaeróbica.

Entre las ventajas de esta prueba se encuentra que es el método más preciso y detallado, ofreciendo información integral sobre el perfil metabólico y respiratorio del deportista. Sin embargo, sus desventajas incluyen la necesidad de un laboratorio especializado, personal capacitado, equipamiento costoso y un tiempo considerable para su realización, lo que limita su accesibilidad para muchos deportistas.

- **Prueba de lactato en protocolo escalonado (sin análisis de gases)**

La prueba de lactato en protocolo escalonado, sin análisis de gases, tiene como objetivo identificar los puntos de inflexión en la acumulación de lactato, como los 2 mmol/L para el umbral aeróbico y los 4 mmol/L para el umbral anaeróbico.

Este *test* se realiza mediante un protocolo incremental similar al de la prueba metabólica completa, pero el énfasis está en la toma de muestras de sangre capilar a distintas intensidades.

Para su interpretación, se traza la curva de lactato en función de la velocidad o potencia, y se localizan los puntos de cambio o umbrales metabólicos.

Aunque es menos completo que el análisis de gases, este método ofrece una determinación válida de los umbrales basados en lactato. Además, es relativamente más económico que la prueba metabólica completa, aunque sigue siendo invasivo por la necesidad de punciones repetidas y requiere un lactatómetro confiable.

- **Prueba de intercambio de gases (ventilatorio) sin lactato**

En algunos laboratorios, solo se dispone de un analizador de gases para medir el  $\text{VO}_2$ ,  $\text{VCO}_2$  y la ventilación, sin la toma de muestras sanguíneas.

Con este método pueden detectarse los umbrales ventilatorios  $\text{VT}_1$  y  $\text{VT}_2$  a partir de cambios en la pendiente ventilatoria, específicamente en las razones  $\text{VE}/\text{VO}_2$  y  $\text{VE}/\text{VCO}_2$ . Aunque no se conoce el nivel real de lactato, existe una correlación razonable entre estas variables ventilatorias y la acumulación de lactato en sangre.

La principal limitación es que se asume que los marcadores ventilatorios coinciden con los umbrales de lactato, lo cual, aunque común y práctico, puede presentar variaciones individuales.

## 2. Pruebas de campo

Para muchos atletas y entrenadores resulta más práctico y accesible medir los umbrales **fuera del laboratorio**, aprovechando pistas o entornos deportivos reales:

- **Test de Conconi**

El *test* de Conconi, popularizado por Francesco Conconi en la década de 1980, se basa en la relación lineal, hasta cierto punto, entre la frecuencia cardíaca y la velocidad de carrera.

El protocolo consiste en correr en pista, aumentando gradualmente la velocidad cada 200 metros, mientras se registran la frecuencia cardíaca y la velocidad en cada tramo.

La interpretación del test se centra en la búsqueda de un punto de inflexión o deflexión en la curva frecuencia cardíaca-velocidad, que se asocia con el umbral anaeróbico.

Sin embargo, este método ha recibido críticas debido a que su exactitud puede verse afectada por factores individuales y la dificultad para identificar claramente la deflexión en la frecuencia cardíaca. Aunque es ampliamente usado en campo, no siempre presenta una correlación perfecta con el umbral de lactato determinado en laboratorio.

- **Test de tiempo constante (TT, *time trial*)**

El *test* de tiempo constante (TT, *time trial*) consiste en que el deportista corra o pedalee lo más rápido posible durante un tiempo determinado, generalmente entre 20 y 30 minutos. Durante este período se registra la frecuencia cardíaca media o la potencia media.

Se estima que la frecuencia cardíaca media obtenida en este test puede aproximar la frecuencia cardíaca correspondiente al umbral anaeróbico. De manera similar, en ciclismo, la potencia media alcanzada en 20 minutos, ajustada con un factor de corrección del 95 %, se asocia al FTP (*functional threshold power*).

Entre las ventajas de este método destacan su simplicidad y especificidad deportiva, además de no requerir equipamiento costoso. Por otro lado, sus desventajas incluyen que el resultado depende de la motivación del atleta y de las condiciones ambientales, y que no discrimina claramente entre el umbral aeróbico y anaeróbico, acercándose más a un valor representativo del rendimiento submáximo prolongado.

- **Test de lactato de campo**

El *test* de lactato de campo puede realizarse mediante protocolos escalonados en pista o utilizando un potenciómetro en ciclismo, tomando muestras de lactato cada vez que se incrementa la velocidad o potencia.

Este método proporciona información directa sobre la curva de lactato, similar a la obtenida en laboratorio, pero con la ventaja de mayor especificidad, ya que se realiza en condiciones y terrenos reales.

Desde el punto de vista logístico, requiere la presencia de un técnico capacitado para realizar las mediciones y un lactatómetro portátil confiable.

- **Métodos subjetivos y RPE**

Aunque menos exacto, algunos entrenadores identifican zonas de intensidad cercanas a los umbrales a partir de la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) y la experiencia del deportista. Por ejemplo, un cambio marcado en la respiración y la dificultad para mantener una conversación suelen indicar que se está aproximando al umbral anaeróbico.

Este método resulta útil como guía complementaria, especialmente cuando se combina con la medición de la frecuencia cardíaca y la observación del rendimiento, aunque no reemplaza la precisión de pruebas de lactato o análisis de gases.

## **Aplicaciones de los umbrales en la planificación**

Los umbrales metabólicos permiten establecer herramientas prácticas que facilitan la organización del entrenamiento y la competición. A continuación, se presentan algunos usos fundamentales: la definición de zonas de entrenamiento, el control de las cargas semanales, la evaluación del progreso del deportista y la optimización de la estrategia competitiva.

1. **Definición de zonas de entrenamiento.** Muchos modelos de periodización establecen 5-7 zonas de intensidad, diferenciando las áreas por debajo del umbral aeróbico, entre umbrales y por encima del umbral anaeróbico. Esto ayuda a organizar las sesiones (extensivas, intensivas, interválicas, de tolerancia al lactato, etc.) con fines específicos.
2. **Control de cargas semanales.** Al cuantificar el tiempo que el deportista pasa en cada zona (por ejemplo, usando un pulsómetro o potenciómetro), se asegura un **volumen adecuado** en la zona aeróbica base y una **proporción suficiente** de entrenamiento cercano o por encima del umbral anaeróbico para mejorar la resistencia de alta intensidad.
3. **Evaluación del progreso.** Repetir periódicamente las pruebas de umbral permite observar si el deportista logra **correr/pedalear más rápido** o a mayor potencia en un mismo nivel de lactato, indicando adaptaciones positivas. También se detecta si la FC al umbral disminuye, lo que revela una mayor eficiencia cardiovascular y mejor economía.
4. **Optimización de la estrategia competitiva.** El conocimiento de los umbrales ayuda a planificar la táctica de carrera, es decir, saber hasta qué ritmo se puede sostener sin desbordar la producción de lactato, y a prevenir «pájaras» o crisis de fatiga por una intensidad excesiva en etapas tempranas. En eventos de larga duración, mantenerse justo por debajo o alrededor del umbral anaeróbico puede maximizar el rendimiento y retrasar la acumulación extrema de lactato.

## Conclusiones

Los **umbrales metabólicos**, tanto el **umbral aeróbico** como el **umbral anaeróbico**, constituyen puntos de referencia fundamentales para entender la fisiología del rendimiento y **diseñar entrenamientos** orientados a objetivos específicos de resistencia, tolerancia al lactato y desarrollo cardiovascular. Su **determinación** puede realizarse mediante pruebas de laboratorio (análisis de gases, lactato) o en el campo (tests escalonados, pruebas contrarreloj, curvas de FC-velocidad).

Conocer y aplicar estos umbrales permite:

- individualizar la intensidad del entrenamiento;
- mejorar la economía del esfuerzo a diferentes ritmos;
- aumentar la capacidad de soportar y procesar el lactato;
- formular estrategias de competición más racionales y eficientes.

En la práctica, la integración de los datos de umbrales con otras métricas (frecuencia cardíaca, potencia, RPE, variabilidad de la frecuencia cardíaca) posibilita un control fino de la carga interna, una evolución progresiva del rendimiento y una prevención efectiva del sobreentrenamiento. Así, los umbrales metabólicos se consolidan como herramientas imprescindibles en la fisiología aplicada al deporte moderno.

## **Estrategias para mejorar la eficiencia energética**

La eficiencia energética en el ejercicio se refiere a la capacidad del organismo para utilizar de forma óptima los sustratos —carbohidratos, grasas y proteínas— y el oxígeno (en el caso del metabolismo aeróbico), con el fin de maximizar el rendimiento y reducir la fatiga. Al planificar el entrenamiento y la nutrición, el objetivo es que el deportista genere la mayor cantidad posible de energía con un costo interno menor, lo que se traduce en un mejor desempeño en competiciones y en una mayor economía de movimiento durante actividades prolongadas.

En este apartado se abordan dos áreas clave para lograr estas mejoras: los entrenamientos específicos que potencian la economía y la capacidad de los sistemas energéticos, y las adaptaciones nutricionales que garantizan la disponibilidad de sustratos y optimizan los procesos metabólicos.

### **Entrenamientos específicos**

A continuación, se describen los principales tipos de entrenamiento que contribuyen a optimizar el rendimiento y el aprovechamiento de los sistemas energéticos.

- **Trabajo de base aeróbica**

El trabajo de base aeróbica consiste en sesiones de moderada intensidad, generalmente entre el 60 y el 75 % del VO<sub>2</sub> máx., y de duración sostenida que puede variar desde 30 minutos hasta varias horas, dependiendo de la disciplina deportiva.

El objetivo principal de este tipo de entrenamiento es desarrollar la capacidad aeróbica y favorecer las adaptaciones estructurales del músculo, como el aumento del número de mitocondrias y la densidad capilar. Estas adaptaciones promueven un uso más eficiente del oxígeno y un mayor aprovechamiento de las grasas como combustible durante el ejercicio.

Como resultado, el deportista mejora su habilidad para mantener ritmos cómodos con un bajo coste energético. Además, estas adaptaciones facilitan la oxidación de lípidos y ayudan a conservar el glucógeno, permitiendo rendir mejor en intensidades mayores o en momentos decisivos de la competencia.

- **Entrenamiento en umbral (*threshold training*)**

El entrenamiento en umbral consiste en realizar esfuerzos próximos al umbral anaeróbico, es decir, esa intensidad en la que la producción de lactato comienza a aumentar de manera notoria.

La metodología incluye intervalos de 10 a 20 minutos cerca del umbral, con recuperaciones cortas, y carreras continuas de 20 a 40 minutos a ritmo estable, justo por debajo o en torno al umbral láctico (por ejemplo, 80-90 % del VO<sub>2</sub> máx.).

Entre los beneficios se encuentran retrasar la acumulación de lactato, incrementar la tolerancia a esfuerzos submáximos, mejorar la eficiencia mecánica y la economía de movimiento a intensidades relativamente altas, y aumentar la capacidad de sostener una velocidad o potencia concreta durante más tiempo antes de caer en fatiga.

- **Trabajo interválico de alta intensidad (HIIT)**

El trabajo interválico de alta intensidad (HIIT) consiste en series o repeticiones breves, de entre 30 segundos y 4 minutos, realizadas a una intensidad cercana o superior al VO<sub>2</sub> máx., intercaladas con descansos incompletos.

Los efectos fisiológicos incluyen mejoras significativas en la potencia aeróbica y en la capacidad de reclutamiento de fibras musculares, incluso las de tipo II, dentro de un contexto aeróbico. También se observa un aumento de la sensibilidad a la insulina y de la capacidad para procesar lactato, así como una optimización de la economía de carrera y la potencia de salida en deportes cíclicos como el ciclismo o el remo.

En cuanto a su aplicación, el HIIT es muy útil en fases de desarrollo o de puesta a punto, cuando se busca un aumento rápido del VO<sub>2</sub> máx. Sin embargo, debe dosificarse con cuidado para evitar el sobreentrenamiento y requiere una base aeróbica previa adecuada.

- **Fortalecimiento muscular y biomecánica**

El fortalecimiento muscular y la mejora biomecánica son fundamentales para que un atleta gaste menos energía al desplazarse a la misma velocidad, gracias a una mayor fuerza muscular y una técnica adecuada en su disciplina.

Entre los ejercicios recomendados se incluyen el entrenamiento de fuerza con pesas, máquinas y ejercicios funcionales, enfocado en la hipertrofia moderada, la resistencia a la fatiga y la potencia en la fase de competición. Además, el trabajo de técnica de carrera o pedalada, ejercicios de propiocepción y corrección postural contribuyen a reducir los «gestos ineficaces» y mejorar la coordinación neuromuscular.

Los resultados de estas prácticas son un menor coste energético por repetición del gesto —ya sea zancada, pedaleo o brazada—, una mayor estabilidad articular y un



menor riesgo de lesiones, lo que permite entrenar de forma continua y lograr adaptaciones duraderas.

### Entrenamiento en condiciones específicas y periodización

Para optimizar el rendimiento, es fundamental considerar las adaptaciones necesarias frente a diferentes entornos y diseñar un plan de entrenamiento progresivo y organizado. La adaptación a condiciones ambientales particulares, como la altitud o el calor, junto con una periodización adecuada, permiten maximizar las respuestas fisiológicas y preparar al atleta para las demandas específicas de la competición.

- **Adaptación a entornos.** Entrenar en **altitud** (cuando está indicado) puede mejorar la producción de glóbulos rojos, incrementando la capacidad de transporte de oxígeno. Con un programa bien gestionado, se potencia la eficiencia aeróbica al retornar a nivel del mar. En entornos calurosos o con humedad elevada, el cuerpo se adapta para **mejorar la termorregulación** y conservar energía.
- **Enfoque progresivo (periodización).** Empezar con el desarrollo de la base aeróbica y la fuerza general, luego introducir intervalos y trabajos de umbral, finalizando con sesiones de velocidad y afinamiento antes de la competición. Esta secuencia garantiza que cada tipo de entrenamiento construya sobre los logros del anterior, fortaleciendo la **eficiencia global**.

### Adaptaciones nutricionales

A continuación, se describen los elementos más importantes para una planificación nutricional adecuada: el balance calórico y la distribución de macronutrientes, la sincronización de nutrientes durante el día, la suplementación y consideraciones específicas, así como el estado de hidratación.

#### 1. Balance calórico y macronutrientes

- **Adecuación calórica.** La adecuación calórica es fundamental para deportistas con altos requerimientos energéticos debido a un gran volumen de entrenamiento. Es imprescindible que aseguren un aporte calórico suficiente para mantener la masa muscular y facilitar una adecuada recuperación. Por el contrario, un balance energético negativo prolongado puede ocasionar un descenso en el rendimiento, un aumento de la fatiga y alteraciones hormonales que afectan la salud y el desempeño.
- **Distribución de macronutrientes**

- **Carbohidratos:** son la principal fuente de energía en ejercicios de moderada-alta intensidad. Reponer glucógeno muscular es clave para sostener los entrenamientos y maximizar la **eficiencia** en esfuerzos submáximos y máximos. Las recomendaciones oscilan entre 5-12 g/kg de peso/día según la fase de la temporada y el tipo de deporte.
- **Grasas:** un consumo adecuado de ácidos grasos saludables (monoinsaturados, poliinsaturados) beneficia la salud y la capacidad de oxidar grasas. Los atletas de resistencia desarrollan adaptaciones que incrementan la **utilización de lípidos** a intensidades moderadas, retrasando el agotamiento del glucógeno.
- **Proteínas:** las proteínas son imprescindibles para la recuperación muscular, la síntesis y reparación de tejidos. En deportes de resistencia, la ingesta recomendada oscila entre 1,2 y 1,6 g/kg/día, mientras que en disciplinas de fuerza puede alcanzar de 1,6 a 2,2 g/kg/día. Garantizar un aporte proteico equilibrado favorece la eficiencia metabólica al mantener una musculatura sana y capaz de trabajar sin fatiga prematura.

## 2. Sincronización de nutrientes (*nutrient timing*)

- **Antes del ejercicio.** Antes del ejercicio, es recomendable consumir carbohidratos de asimilación lenta, como avena, arroz integral o pan integral, combinados con proteínas ligeras, aproximadamente 2 a 3 horas antes de la sesión. Esta estrategia asegura la disponibilidad de glucógeno sin provocar picos bruscos de insulina. En el caso de entrenamientos tempranos, cuando el tiempo es limitado, se puede optar por un desayuno liviano pero rico en carbohidratos de rápida absorción, como bananas o zumos.
- **Durante el ejercicio.** Durante el ejercicio, especialmente en actividades prolongadas o de alta intensidad, es importante ingerir bebidas isotónicas, geles o barritas que aporten entre 30 y 60 gramos de carbohidratos por hora, junto con electrolitos, cuando el esfuerzo supera los 60 a 90 minutos. Esto ayuda a mantener estables los niveles de glucosa en sangre y retrasa la aparición de la fatiga. Además, es fundamental favorecer la hidratación continua para optimizar las reacciones enzimáticas y la termorregulación durante el ejercicio.
- **Después del ejercicio.** Después del ejercicio, durante la ventana anabólica de recuperación, es fundamental recargar las reservas de glucógeno consumiendo carbohidratos de índice glucémico medio-alto en la primera hora tras la sesión. También es importante ingerir proteínas de calidad, en una cantidad de entre 20 y 40 gramos, para favorecer la reparación muscular y la síntesis proteica. Una combinación ideal para este momento puede incluir una bebida que combine carbohidratos y proteínas, acompañada de

fruta, leche o yogur, y cereales. Este aporte oportuno maximiza la recuperación y prepara el cuerpo para el siguiente entrenamiento.

### 3. Suplementación y consideraciones específicas

- **Suplementos ergogénicos.** Entre los suplementos ergogénicos más utilizados se encuentran la **cafeína**, que ayuda a reducir la percepción del esfuerzo y a aumentar la oxidación de grasas en ciertas intensidades; la **beta-alanina**, que eleva los niveles de carnosina en el músculo, amortiguando la acidez y retrasando la fatiga en ejercicios de alta intensidad relacionados con la glucólisis anaeróbica; y la **creatina**, que incrementa las reservas de fosfocreatina (PCr) y mejora la potencia máxima. El uso de creatina es especialmente beneficioso en deportes explosivos y de fuerza, aunque también puede contribuir a la recuperación en esfuerzos intermitentes.
- **Dietas específicas.** Las dietas específicas incluyen la **periodización de carbohidratos**, que consiste en ajustar la ingesta de estos según el tipo de sesión, diferenciando entre días de alta intensidad y días de rodaje suave. Esta estrategia puede entrenar al cuerpo para utilizar más grasas cuando hay menor disponibilidad de glucógeno, mejorando así la eficiencia energética total. Por otro lado, la **dieta rica en grasas, o adaptación cetogénica**, se explora en algunos casos, especialmente en ultrarresistencia. Sin embargo, este enfoque requiere un proceso cuidadoso y no es necesariamente óptimo para todos los atletas, sobre todo en deportes de intensidad media-alta, donde los carbohidratos son un sustrato fundamental.
- **Estado de hidratación.** El estado de hidratación es fundamental para mantener la eficiencia durante el ejercicio. Incluso una deshidratación leve, que suponga la pérdida del 2 % de la masa corporal, afecta negativamente el rendimiento, elevando la frecuencia cardíaca y aumentando la percepción del esfuerzo. Por ello, es esencial asegurar un consumo adecuado de agua y electrolitos, como sodio y potasio, antes, durante y después del ejercicio. Esto contribuye a mantener el volumen plasmático en niveles óptimos, mejorando el rendimiento y facilitando el transporte de nutrientes.

### Conclusiones

Para **mejorar la eficiencia energética**, se requiere un abordaje integral que combine **entrenamientos específicos** con **adaptaciones nutricionales** bien planificadas:

- **Entrenamientos aeróbicos de base**, trabajos de **umbral**, **intervalos de alta intensidad** y sesiones de **fuerza y técnica** configuran un programa que potencia la economía de movimiento, la capacidad oxidativa y la tolerancia a intensidades altas.
- **La nutrición** aporta los sustratos necesarios (carbohidratos, grasas, proteínas) en cantidades y momentos adecuados para sostener un gasto energético elevado y promover la recuperación. Incluir estrategias de

*nutrient timing* y, cuando proceda, suplementos ergogénicos, contribuye a pulir los detalles del rendimiento.

- La **periodización adecuada** (tanto del entrenamiento como de la dieta) asegura que cada fase se enfoque en maximizar las adaptaciones deseadas, logrando así un proceso de mejora continua en la **eficiencia** con que el cuerpo produce y utiliza la energía.

Este enfoque integrado refuerza la premisa de que el rendimiento no depende solo de cuán fuerte se entrena, sino también de **cómo** se entrena y **cómo** se nutre el organismo para desarrollar y sostener sus capacidades al más alto nivel. Con una metodología coherente y una alimentación estratégica, los deportistas alcanzan mayores niveles de **economía** y, con ello, un rendimiento superior en sus respectivos deportes.

## Unidad 2. Lactato y fatiga muscular

### Papel del lactato en el metabolismo energético

El lactato es uno de los metabolitos más estudiados en el ámbito de la fisiología del ejercicio y, durante décadas, ha sido objeto de numerosos mitos que lo asociaban con la fatiga, las agujetas o el dolor muscular. Sin embargo, la evidencia científica actual demuestra que el papel del lactato es mucho más complejo e incluso beneficioso para la producción de energía y la comunicación metabólica entre órganos y tejidos. Comprender su función real aporta claridad para diseñar entrenamientos, interpretar pruebas de esfuerzo y manejar la fatiga deportiva.

Durante mucho tiempo se pensó que el llamado «ácido láctico» se acumulaba en el músculo durante esfuerzos intensos, provocando ardor y fatiga, y se culpaba al lactato de las agujetas o DOMS (*delayed onset muscle soreness*), que aparecen uno o dos días después del ejercicio. Sin embargo, las agujetas están más vinculadas a microlesiones estructurales en las fibras musculares, especialmente en contracciones excéntricas, que desencadenan procesos inflamatorios, y no a la presencia de lactato.

El lactato puede acumularse transitoriamente en el músculo y la sangre durante esfuerzos de alta intensidad, pero no permanece por largos períodos, ya que se metaboliza y reutiliza rápidamente, en minutos o pocas horas tras el ejercicio. El ardor muscular que se siente durante un *sprint* o un levantamiento intenso se relaciona más con el incremento de iones hidrógeno (H<sup>+</sup>) y la alteración del pH local que con el lactato en sí. De hecho, el lactato en su forma fisiológica —lactato<sup>-</sup> en lugar de ácido láctico— puede ayudar a tamponar en parte dicha acidez.

Anteriormente, se asumía que el lactato era simplemente un «residuo tóxico» de la glucólisis anaeróbica, señal de ineficiencia y fatiga, pero hoy se sabe que no es un producto inútil. Por el contrario, es un intermediario metabólico que puede ser oxidado en el mismo músculo o en otros tejidos, como el corazón, el hígado y fibras musculares más aeróbicas. Existen rutas de reciclaje del lactato, como el ciclo de Cori, mediante el cual el hígado reconvierte el lactato en glucosa, aportando combustible nuevamente al organismo.

Además, el lactato cumple funciones de señalización, actuando como mensajero que activa vías de adaptación celular, estimula la biogénesis mitocondrial y regula la expresión de ciertos genes relacionados con el metabolismo energético.

### **Interpretación de los niveles de lactato y la fatiga**

La interpretación de los niveles de lactato en relación con la fatiga requiere considerar varios aspectos. A intensidades muy altas, el lactato en sangre aumenta porque la demanda de ATP supera la capacidad oxidativa del organismo. Sin embargo, la fatiga no se debe únicamente a la acumulación de lactato, sino principalmente a la acidez generada y al desequilibrio en los sustratos energéticos. En pruebas de laboratorio, la medición del lactato se utiliza para determinar los umbrales metabólicos, como el umbral aeróbico y anaeróbico. Un aumento brusco en la curva de lactato indica que se está alcanzando una intensidad difícil de sostener por largo tiempo, aunque el lactato no sea el principal “culpable”, sino más bien la insuficiencia del sistema aeróbico para cubrir la demanda energética y el incremento del metabolismo glucolítico, que genera una mayor producción de iones hidrógeno (H<sup>+</sup>).

### **Función como fuente de energía y señalizador metabólico**

Como podemos comprender, el lactato cumple múltiples funciones durante el ejercicio y la recuperación. A continuación, se describen su papel como sustrato energético, su participación en el ciclo de Cori y la gluconeogénesis, así como su rol como molécula señalizadora que regula adaptaciones metabólicas y hormonales.

#### **1. Lactato como sustrato energético**

##### **• Oxidación de lactato**

Durante el ejercicio de intensidad moderada y en la recuperación activa, parte del lactato producido se transporta desde las fibras musculares rápidas (tipo II) hacia las fibras musculares lentas (tipo I), que son más ricas en mitocondrias. En estas fibras lentas, el lactato puede reconvertirse en piruvato e ingresar en el ciclo de Krebs para producir energía.

Además, el corazón utiliza el lactato como combustible preferencial. Gracias a su alta densidad mitocondrial, este órgano metaboliza de manera eficiente el lactato que recibe a través de la sangre, transformándolo en energía para su funcionamiento.

Gracias a este proceso, el lactato contribuye a sostener la producción de ATP incluso en condiciones de alta intensidad, cuando la disponibilidad de oxígeno no es óptima para todas las fibras musculares. Además, permite redistribuir la carga metabólica dentro del músculo y hacia otros órganos, optimizando así el rendimiento general del organismo.

## 2. El ciclo de Cori y la gluconeogénesis

- **Reciclaje en el hígado**

El lactato que llega al hígado puede ser convertido nuevamente en glucosa mediante el proceso de gluconeogénesis. Esta glucosa regresa a la circulación y puede ser utilizada por el músculo para generar ATP.

Este mecanismo es especialmente relevante en esfuerzos prolongados, ya que ayuda a evitar el agotamiento rápido de las reservas de glucógeno y mantiene la glucemia dentro de rangos funcionales para el organismo.

Una buena adaptación aeróbica mejora la capacidad para utilizar el lactato, tanto en las fibras musculares lentas como en órganos como el hígado, lo que contribuye a retrasar la fatiga en actividades de duración intermedia y alta intensidad.

La práctica de entrenamientos interválicos y de umbral favorece la aceleración del transporte y la oxidación del lactato en diversos tejidos, una estrategia conocida como *lactate shuttling*.

## 3. Lactato como molécula señalizadora

- **Regulación de genes**

Estudios recientes indican que el lactato puede activar rutas de señalización celular que promueven adaptaciones positivas, como el aumento de mitocondrias y la mejora de los mecanismos de defensa antioxidante.

- **Influencia hormonal**

La presencia de lactato en sangre se correlaciona con la liberación de hormonas como la **adrenalina**, que moviliza reservas energéticas y favorece la respuesta simpática durante el ejercicio.

- **En la recuperación**

El lactato remanente después de un entrenamiento intenso puede servir como disparador de procesos de **recuperación** y **reparación** muscular, siempre y cuando se combinen con una buena estrategia de nutrición y descanso.

## Conclusiones

Lejos de ser un enemigo indeseable, el lactato desempeña un papel crucial en el metabolismo energético y en los mecanismos de adaptación al ejercicio.

En primer lugar, existen varios mitos asociados al lactato. No es responsable directo del dolor muscular tardío ni una simple «basura» metabólica. Su concentración elevada durante el ejercicio indica un aumento en la glucólisis anaeróbica, pero la fatiga implica múltiples factores, como la acidez local y la reducción en la capacidad del sistema nervioso para reclutar fibras de manera óptima.

Como fuente de energía, el lactato se convierte en piruvato y puede ser oxidado en el músculo, el corazón y otros tejidos. Además, el ciclo de Cori permite su reciclaje en el hígado, generando nueva glucosa para mantener la actividad muscular.

En cuanto a su función como señalizador metabólico, el lactato actúa como mensajero que influye en la adaptación celular, la biogénesis mitocondrial y la liberación de hormonas. Un entrenamiento regular y bien diseñado mejora la eficiencia en la producción y uso del lactato, retrasando la fatiga y potenciando el rendimiento.

En conclusión, el lactato no es el villano, sino un aliado del cuerpo que refleja la intensidad del ejercicio y sirve como intermediario para gestionar la energía. Manejar inteligentemente la intensidad, la recuperación y la nutrición — especialmente el consumo de carbohidratos— permite aprovechar los beneficios del lactato y minimizar la aparición prematura de fatiga. De esta forma, los atletas pueden entrenar y competir con una comprensión más profunda de lo que realmente sucede en sus músculos y su metabolismo.

## **Producción y aclaramiento del lactato**

Durante el ejercicio, la producción de lactato se intensifica cuando la demanda de ATP supera la capacidad del metabolismo oxidativo para suministrar energía. En ese momento, la vía glucolítica anaeróbica entra en acción, generando piruvato, una parte del cual se transforma en lactato. Aunque la acumulación de lactato es más notable en esfuerzos de alta o máxima intensidad, este proceso ocurre en todas las intensidades, aunque en menor proporción.

### **Factores que influyen en sus niveles durante el ejercicio**

La concentración de lactato en sangre y músculo depende de múltiples variables que afectan su producción, uso y aclaramiento. A continuación, se describen algunos de los principales factores fisiológicos, genéticos y hormonales que modulan estos niveles en función de la intensidad y las características individuales del deportista.

#### **1. Intensidad del esfuerzo**

La intensidad del esfuerzo es un factor determinante en la concentración de lactato. A medida que la intensidad aumenta, el cuerpo necesita más energía en menos tiempo, lo que sobrecarga la vía aeróbica y eleva la producción de lactato a través de la vía glucolítica. Sin embargo, en intensidades moderadas, la producción de lactato puede ser compensada por su aclaramiento mediante oxidación y reciclaje, manteniendo niveles relativamente estables.

## 2. Capacidad aeróbica

La capacidad aeróbica influye directamente en el manejo del lactato. Cuanto más desarrollado esté el sistema aeróbico, mayor será la habilidad de las fibras musculares y de órganos como el corazón y el hígado para utilizar el lactato como fuente de energía. Un atleta con un alto VO<sub>2</sub> máx. y una elevada densidad mitocondrial podrá procesar más piruvato de forma oxidativa, disminuyendo así la necesidad de convertirlo en lactato.

## 3. Tipo de fibra muscular

El tipo de fibra muscular también afecta la producción y el uso del lactato. Las fibras tipo II, o rápidas, tienden a generar más lactato debido a su alta concentración de enzimas glucolíticas y menor densidad mitocondrial. En contraste, las fibras tipo I, o lentas, están mejor preparadas para oxidar lactato, ya que poseen una mayor cantidad de mitocondrias y enzimas aeróbicas.

## 4. Flujo sanguíneo y transporte

Un flujo sanguíneo adecuado ayuda a **arrastrar** el lactato desde los músculos activos hasta otros tejidos que pueden metabolizarlo. Durante ejercicios muy intensos, la **vasoconstricción** en ciertos territorios puede ralentizar el aclaramiento.

## 5. Factores genéticos y hormonales

Los factores genéticos y hormonales también influyen en los niveles de lactato durante el ejercicio. Algunas predisposiciones genéticas favorecen una mayor capacidad para almacenar glucógeno o para procesar el lactato de manera eficiente. Además, el aumento de catecolaminas, como adrenalina y noradrenalina, en esfuerzos intensos estimula la glucogenólisis y la glucólisis rápida, lo que incrementa aún más la producción de lactato.

## Importancia del entrenamiento en su gestión

El entrenamiento tiene un rol fundamental en la habilidad del organismo para controlar los niveles de lactato, tanto en la producción como en el aclaramiento.

### 1. Entrenamiento aeróbico

- Aumenta la **capilarización** y la **densidad mitocondrial**, mejorando la capacidad para **oxidar** lactato (vía ciclo de Krebs) y su transporte hacia tejidos como el corazón.
- Retrasa la aparición de niveles excesivos de lactato a una intensidad dada, posponiendo la fatiga.

## 2. Entrenamiento de tolerancia al lactato (anaeróbico)

- Incluye intervalos de alta intensidad cerca o por encima del **umbral anaeróbico**.
- Fomenta la producción de **sistemas tampón** (que ayudan a neutralizar el exceso de H+) y mejora la **enzimática glucolítica**, permitiendo tolerar mayores concentraciones de lactato sin perder funcionalidad.

## 3. Ajustes hormonales y enzimáticos

- El entrenamiento regular modifica la **expresión de enzimas** clave (LDH, fosfofructoquinasa, etc.), facilitando una mayor eficiencia en la glucólisis y en la oxidación de lactato.
- También altera la **respuesta catecolaminérgica**, modulando la rapidez con que se produce el lactato.

## 4. Recuperación activa y entrenamiento cruzado

- Desarrollar una buena base aeróbica en combinación con entrenamientos de potencia o resistencia anaeróbica permite un **equilibrio** que maximiza la producción de energía y el **consumo** de lactato post-esfuerzo.

## Relación entre lactato y fatiga muscular

El lactato suele asociarse directamente con la fatiga, pero el proceso es más complejo. El lactato en sí no causa fatiga directa; más bien, el aumento de iones hidrógeno (H<sup>+</sup>), que provoca una disminución del pH durante la producción acelerada de lactato, contribuye a la acidez muscular. Esta acidez afecta la función enzimática y el acoplamiento de las proteínas contráctiles.

Además, otros factores como la disponibilidad de ATP, el daño muscular, la fatiga neuromuscular y la depleción de glucógeno también participan en la fatiga global del músculo.

Sin embargo, la concentración de lactato es un indicador de un elevado uso de la vía glucolítica y suele coincidir con la incapacidad progresiva para mantener la intensidad del esfuerzo.

### ¿Cómo afecta el lactato en el rendimiento?

El lactato y la acidez muscular influyen en el rendimiento a través de diversos mecanismos que afectan la función muscular, la percepción de esfuerzo y la regulación metabólica. A continuación, se describen sus principales efectos en estos aspectos.

- **Inhibición de enzimas y contracción.** La disminución del pH intramuscular puede inhibir o ralentizar enzimas clave como la fosfofructoquinasa, lo que afecta la velocidad de la glucólisis. Además, la acumulación de iones hidrógeno (H<sup>+</sup>) puede interferir con la acción de las proteínas contráctiles, como la actina y la miosina, dificultando la contracción muscular eficiente.
- **Percepción de esfuerzo.** Un aumento rápido de lactato y acidez se traduce en una sensación más intensa de fatiga o «ardor muscular», lo que suele llevar a una reducción del ritmo o la intensidad del esfuerzo.
- **Impulso hacia el metabolismo oxidativo.** A medida que los niveles de lactato aumentan, el cuerpo envía una señal que indica la necesidad de incrementar la contribución del metabolismo aeróbico, cuando es posible, con el fin de reequilibrar la producción y eliminación de lactato.

### Estrategias para retrasar la fatiga

Existen distintas formas de mejorar la resistencia y la capacidad para sostener esfuerzos, actuando sobre el metabolismo, la recuperación y la planificación deportiva. A continuación, se presentan las principales estrategias.

1. **Mejorar la capacidad oxidativa.** Mejorar la capacidad oxidativa implica realizar trabajo aeróbico constante y entrenamientos cerca del umbral anaeróbico, lo que incrementa la eficiencia del organismo para producir ATP con una menor acumulación de iones hidrógeno (H<sup>+</sup>).
2. **Incrementar la tolerancia al lactato.** Incrementar la tolerancia al lactato se logra mediante entrenamientos interválicos de alta intensidad y sesiones específicas en las que se busca mantener ritmos por encima del umbral anaeróbico, promoviendo adaptaciones enzimáticas y de tamponamiento.
3. **Recuperación y nutrición.** La recuperación y la nutrición son fundamentales para retrasar la fatiga. Es importante asegurar un aporte adecuado de carbohidratos para reponer las reservas de glucógeno, evitando que las fibras musculares dependan prematuramente de la glucólisis anaeróbica.

Además, emplear recuperación activa, como un trote suave tras series intensas, facilita el traslado del lactato hacia los músculos oxidativos, acelerando su metabolismo y eliminación.

4. **Uso inteligente de la competición.** El uso inteligente de la competición implica conocer el umbral anaeróbico del atleta y planificar la táctica de carrera o juego para evitar picos de intensidad excesiva que puedan desencadenar fatiga prematura.

## Aplicaciones prácticas en el entrenamiento deportivo

El control y la monitorización de los niveles de lactato permiten una **planificación precisa** de las cargas de entrenamiento, ajustando intensidades y detectando la necesidad de descanso o de estímulos más potentes. A continuación, se describen los principales métodos de evaluación, la aplicación práctica en la planificación de sesiones específicas y el seguimiento de la adaptación del deportista a lo largo del tiempo.

### 1. Pruebas de campo y laboratorio

Las pruebas de campo y laboratorio consisten en tests incrementales, realizados en pista o cinta ergométrica, donde la velocidad o potencia aumenta en cada etapa mientras se mide la concentración de lactato en sangre.

A partir de la curva obtenida, se identifican el umbral aeróbico (aproximadamente 2 mmol/L) y el umbral anaeróbico (alrededor de 4 mmol/L), lo que permite definir zonas de entrenamiento personalizadas para cada deportista.

### 2. Sesiones específicas

Las sesiones específicas se planifican en la «zona de tolerancia al lactato», es decir, cerca del umbral anaeróbico, con el objetivo de mejorar la resistencia a alta intensidad.

Además, la medición del lactato durante las pausas en entrenamientos interválicos permite ajustar la recuperación y la progresión de la sesión, retomando la siguiente repetición cuando los niveles de lactato hayan descendido a un valor determinado.

### 3. Control de la adaptación

El control de la adaptación se realiza monitoreando la evolución de la curva de lactato a lo largo de la temporada. Si el deportista mantiene la misma velocidad con un nivel menor de lactato, o logra alcanzar velocidades más altas con la misma concentración de lactato, esto indica una mejora en su capacidad para procesar y tolerar el lactato.

## Casos de éxito en deportistas de élite

Diversos atletas de alto nivel en distintas disciplinas han utilizado la medición y el control del lactato para mejorar su rendimiento y optimizar sus entrenamientos. A continuación, se describen ejemplos destacados en fondistas y mediofondistas, triatletas y ciclistas profesionales, así como en deportes de equipo.

### 1. Fondistas y mediofondistas

Los fondistas y mediofondistas, como corredores de 5000, 10 000 metros y medio maratón, se benefician de entrenamientos de umbral y tempo runs que fortalecen su capacidad para mantener altas velocidades con niveles de lactato relativamente bajos.

Asimismo, los atletas de maratón han demostrado que contar con un umbral anaeróbico elevado les permite sostener ritmos cercanos a los de competición durante períodos prolongados, experimentando menos fatiga.

### 2. Triatletas y ciclistas profesionales

Los triatletas y ciclistas profesionales miden regularmente el lactato tanto en laboratorio como durante la bicicleta, usando potenciómetros. Esto les permite definir potencias críticas y planificar esfuerzos en contrarreloj o subidas prolongadas en función de esos datos.

Sus planes semanales incluyen intervalos en zonas específicas de lactato para optimizar la resistencia y mejorar el rendimiento en competición.

### 3. Deportes de equipo

En los deportes de equipo, futbolistas, baloncestistas y rugbiers emplean tests de lactato combinados con GPS y análisis de frecuencia cardíaca para diseñar circuitos de alta intensidad, entrenamientos interválicos y controlar la recuperación de los jugadores.

Conocer la capacidad de recuperación individual tras esfuerzos que elevan el lactato permite tomar decisiones sobre la rotación en partidos, los tiempos de sustitución y la periodización de las cargas de entrenamiento.

## Conclusiones

La producción y el aclaramiento de lactato son procesos dinámicos que pueden gestionarse y optimizarse mediante un entrenamiento adecuado. Lejos de ser un simple «subproducto de desecho», el lactato actúa como un indicador de la intensidad y una fuente de energía para el músculo y otros tejidos.

Aunque las concentraciones elevadas de lactato indican un entorno de acidez y alta exigencia, no es el lactato por sí solo el causante directo de la fatiga; la acumulación de iones hidrógeno (H+) y la limitación del sistema aeróbico desempeñan un papel principal.

La medición de lactato, tanto en laboratorio como en campo, es una herramienta fundamental para identificar umbrales metabólicos y diseñar entrenamientos que desarrollen la tolerancia a la intensidad, la base aeróbica y la velocidad a umbral, aspectos críticos para el éxito en diversas disciplinas deportivas.

Entre las estrategias efectivas se encuentran ajustar las cargas en torno al umbral anaeróbico, incluir intervalos de alta intensidad para mejorar la capacidad de tamponamiento, y mantener una adecuada nutrición y recuperación, pilares que contribuyen a retrasar la fatiga y potenciar el rendimiento.

En la élite, deportistas de fondo, mediofondo, triatlón y deportes colectivos han incorporado el control del lactato para guiar su evolución y maximizar sus capacidades fisiológicas, con resultados comprobados en la práctica competitiva.

Así, comprender a fondo la producción y aclaramiento del lactato, y saber gestionar sus niveles, constituye una ventaja decisiva para entrenadores y deportistas, optimizando el rendimiento y preservando la salud muscular y metabólica a lo largo de la temporada.

## Referencias bibliográficas para consulta

**Brooks, G. A., & Mercier, J.** (1994). Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the «crossover» concept. *Journal of Applied Physiology*, 76(6), 2253–2261.

**Gastin, P. B.** (2001). Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. *Sports Medicine*, 31(10), 725–741.

**Coyle, E. F.** (1995). Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 23, 25–63.

**Robergs, R. A., Ghasvand, F., & Parker, D.** (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 287(3), R502–R516.

**Brooks, G. A.** (2009). Cell–cell and intracellular lactate shuttles. *The Journal of Physiology*, 587(23), 5591–5600.

**Powers, S. K., & Howley, E. T.** (2018). *Exercise Physiology: Theory and Application to Fitness and Performance* (11th ed.). McGraw-Hill Education.



- Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L.** (2019). *Physiology of Sport and Exercise* (7th ed.). Human Kinetics.
- Saltin, B., & Gollnick, P. D.** (1983). Skeletal muscle adaptability: significance for metabolism and performance. In *Handbook of Physiology: Skeletal Muscle* (pp. 555–631). American Physiological Society.
- Gladden, L. B.** (2004). Lactate metabolism: a new paradigm for the third millennium. *Journal of Physiology*, 558(Pt 1), 5–30.
- Bergström, J., Hermansen, L., Hultman, E., & Saltin, B.** (1967). Diet, muscle glycogen and physical performance. *Acta Physiologica Scandinavica*, 71(2–3), 140–150.
- Van Loon, L. J. C., Thom, J. M., Constantin-Teodosiu, D., Saris, W. H. M., & Wagenmakers, A. J. M.** (2001).  $\beta$ -hydroxy- $\beta$ -methylbutyrate supplementation does not change muscle metabolic responses to prolonged exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(5), 757–763.
- Hickson, R. C., Davis, J. A., Moore, A. C., & Holloszy, J. O.** (1977). Linear increase in aerobic power induced by a strenuous program of endurance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 42(1), 372–376.
- Bangsbo, J., Sørensen, H., & Mohr, M.** (2006). Physiological response and fatigue mechanisms in soccer. *Sports Science Exchange*, 19(2), 1–6.
- Laursen, P. B., & Jenkins, D. G.** (2002). The scientific basis for high-intensity interval training. *Sports Medicine*, 32(1), 53–73.
- Bentley, D. J., Newell, J., & Bishop, D.** (2007). Incremental exercise test design and analysis: implications for performance diagnostics in endurance athletes. *Sports Medicine*, 37(7), 575–586.

