

Módulo 1. Lactato y su rol en el ejercicio

Fisiología del lactato

Introducción

El lactato, durante décadas, fue considerado un producto de desecho o un indicador de fatiga muscular. Sin embargo, la visión actual en la fisiología y la bioquímica del ejercicio ha revolucionado nuestro entendimiento sobre su producción, su utilización como sustrato energético y su importancia en la comunicación metabólica entre diferentes tejidos del organismo. Hoy se sabe que el lactato es mucho más que un marcador de estrés fisiológico: es una molécula que desempeña un papel importante en el equilibrio energético, la señalización celular y la recuperación durante y después del ejercicio.

A lo largo de los siguientes apartados, se abordarán los procesos de producción y eliminación del lactato, los factores que condicionan sus niveles en sangre y en músculo, su interpretación en relación con los umbrales metabólicos y, por último, su relevancia en distintas disciplinas deportivas. Comprender estos conceptos nos permitirá optimizar los programas de entrenamiento, mejorar el rendimiento y prevenir el sobreentrenamiento o la fatiga crónica.

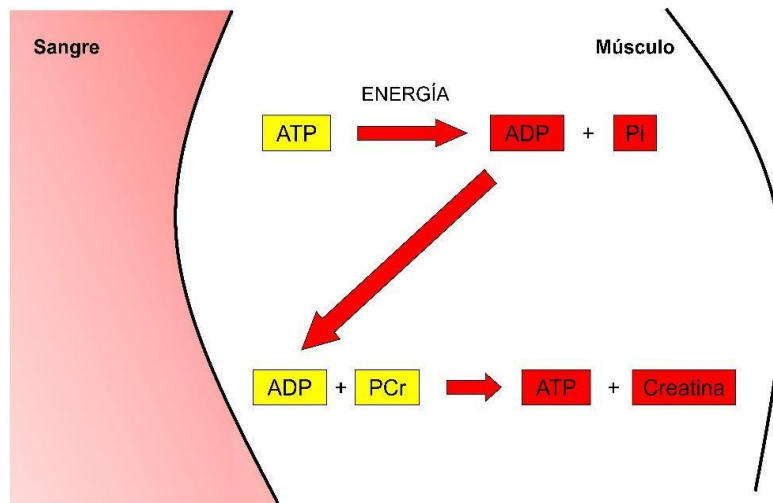
Fisiología de la producción y eliminación del lactato

Vías metabólicas involucradas en la producción de lactato

El lactato se genera principalmente a partir de la glucosa o el glucógeno, mediante el proceso de glucólisis. Este proceso ocurre en el citoplasma celular y puede desarrollarse tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas. No obstante, la vía anaeróbica —cuando la demanda de energía por unidad de tiempo o la disponibilidad de oxígeno en la fibra muscular no es suficiente para sostener todo el proceso oxidativo— es la que más contribuye a la producción de lactato.

En la siguiente figura, podemos observar una vista esquemática de la síntesis de energía mediante la vía anaeróbica aláctica, también conocida como sistema de los fosfágenos o sistema ATP-PCr.

Figura 1. Sistema anaeróbico aláctico (ATP-PCr)



ADP: adenosín difosfato; ATP: adenosín trifosfato; PCr: fosfocreatina; Pi: fósforo inorgánico.

Fuente: Cadefau, 2024.

Glucólisis aeróbica y anaeróbica

- **Glucólisis aeróbica o vía mitocondrial**

En situaciones de trabajo de baja o moderada intensidad, cuando la demanda de potencia energética puede ser cubierta de forma eficiente por los sistemas oxidativos, la glucólisis actúa como la vía inicial para degradar glucosa y aportar piruvato al metabolismo mitocondrial. La glucosa, transformada en dos moléculas de piruvato mediante una secuencia de reacciones enzimáticas en el citosol, libera una pequeña cantidad de energía directa en forma de ATP y produce equivalentes reductores como el NADH.

Mientras la demanda de ATP se mantenga dentro de los límites que la fosforilación oxidativa puede gestionar, el piruvato generado en el citosol se transporta a la matriz mitocondrial a través de sistemas de transporte específicos. Una vez dentro, se convierte en acetil-CoA, que se incorpora al ciclo de Krebs. A través de este ciclo, el acetil-CoA se oxida por completo, generando CO_2 y grandes cantidades de NADH y FADH_2 , que alimentan la cadena de transporte de electrones. Esta cadena, unida a la fosforilación oxidativa, permite transformar la energía de los electrones en ATP de forma sostenida y con alta eficiencia.

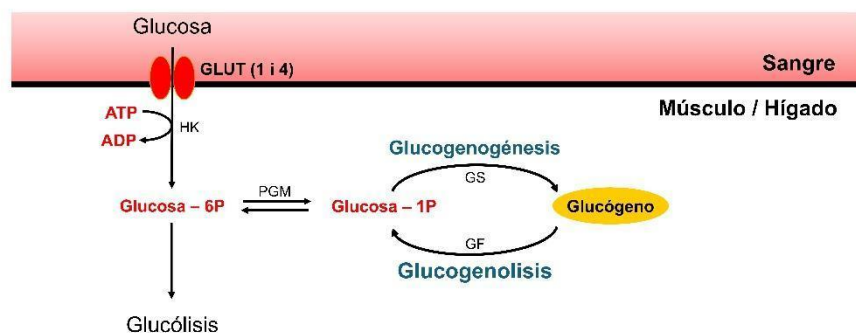
Este rendimiento es viable siempre que la producción de piruvato no exceda la capacidad de procesamiento de las mitocondrias. Cuando la intensidad del ejercicio

aumenta y la demanda de potencia energética supera la velocidad máxima de trabajo del sistema oxidativo, parte del piruvato no puede ser procesado de inmediato y se convierte en lactato en el citosol. Este paso asegura que la glucólisis continúe generando ATP rápidamente, al regenerar el NAD⁺ necesario para sostener la vía activa.

El factor determinante no es únicamente la cantidad de oxígeno disponible a nivel celular o circulante, sino la relación entre la magnitud de ATP que el músculo necesita por unidad de tiempo y la capacidad real de las mitocondrias para mantener la oxidación completa de los sustratos. Cuando la demanda es moderada, predomina la vía aeróbica; cuando es elevada y requiere una velocidad de síntesis de ATP superior a la que puede cubrir el sistema oxidativo, aumenta la participación de la glucólisis rápida, incluso en presencia de oxígeno suficiente.

En este sentido, la glucólisis aeróbica no funciona de forma aislada, sino que se integra en un sistema energético flexible, que ajusta constantemente la proporción entre la oxidación de carbohidratos y grasas según la intensidad del esfuerzo, los tipos de fibras musculares reclutadas y el nivel de adaptación del deportista. Esta flexibilidad metabólica permite mantener la producción de ATP de manera eficiente, minimizar la acumulación de metabolitos que aceleran la fatiga y optimizar el rendimiento en esfuerzos sostenidos.

Figura 2. Proceso de síntesis y degradación del glucógeno



ADP: adenosín difosfato; ATP: adenosín trifosfato; GF: glucógeno fosforilasa; GLUT: transportadores facilitadores de glucosa; GS: glucógeno sintasa; HK: hexoquinasa; PGM: fosfoglucomutasa.

Fuente: Cadefau, 2024.

- **Glucólisis anaeróbica o vía glucolítica**



Cuando la intensidad del ejercicio se incrementa de forma significativa y la demanda de ATP por unidad de tiempo se vuelve muy elevada, la tasa a la que las mitocondrias pueden procesar el piruvato generado en el citosol puede verse superada. En este contexto, no es necesariamente la falta absoluta de oxígeno lo que limita la oxidación completa, sino la incapacidad del sistema oxidativo para responder con suficiente rapidez a la alta demanda de potencia energética impuesta por la musculatura activa.

Para sostener la producción de ATP a un ritmo acorde con la intensidad del esfuerzo, la vía glucolítica acelera su actividad y transforma rápidamente la glucosa en piruvato. Sin embargo, cuando la entrada de piruvato a la mitocondria se vuelve insuficiente frente a la velocidad de producción, se activa una vía de compensación importante: el piruvato se convierte en lactato a través de la acción de la enzima lactato deshidrogenasa (LDH).

Esta conversión no solo permite eliminar el exceso de piruvato que no puede ser oxidado de inmediato, sino que cumple una función esencial: regenera NAD^+ a partir de $\text{NADH} + \text{H}^+$, asegurando la continuidad del flujo de la glucólisis. Este reciclaje de NAD^+ es imprescindible para que la vía glucolítica siga transformando glucosa en ATP a gran velocidad, incluso cuando no hay capacidad oxidativa suficiente para procesar todo el piruvato generado.

La energía obtenida mediante la glucólisis anaeróbica es relativamente baja en términos de ATP total en comparación con la oxidación completa de la glucosa, pero su tasa de producción es significativamente mayor. Por esta razón, en esfuerzos de muy alta intensidad o máxima potencia —como *sprints*, repeticiones de fuerza o fases de ataque en deportes de resistencia—, la vía glucolítica se convierte en la principal fuente de ATP de acción inmediata.

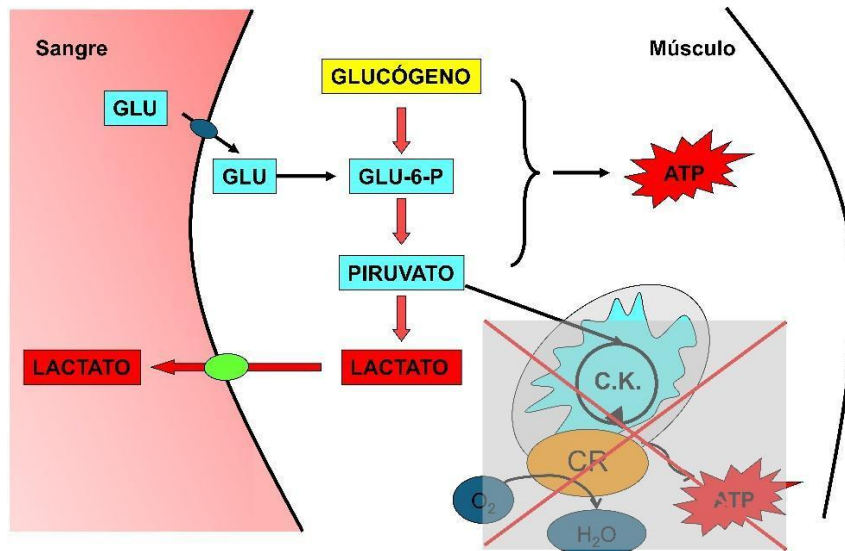
Este mecanismo tiene, sin embargo, un coste fisiológico. La rápida disociación de ATP y la alta tasa de producción de piruvato y lactato provocan una acumulación de protones (H^+) en el interior de la célula muscular, lo que disminuye el pH local. Aunque el lactato no es el responsable directo de esta acidificación —sino la propia hidrólisis del ATP—, su presencia indica que el sistema tamponador está operando al límite para contrarrestar la acidez resultante de la elevada actividad glucolítica. Este desequilibrio contribuye a la aparición de fatiga metabólica, a la reducción de la eficiencia contráctil y a la necesidad de activar mecanismos de aclaramiento y reciclaje del lactato en tejidos vecinos o en el hígado.

En conjunto, la glucólisis anaeróbica es un recurso metabólico fundamental para sostener la potencia cuando la velocidad de síntesis de ATP requerida por la actividad muscular excede la capacidad de la fosforilación oxidativa. Su activación permite prolongar la intensidad máxima durante segundos o minutos, según la



tolerancia individual, el nivel de entrenamiento y la capacidad de aclaramiento del lactato y los protones generados.

Figura 3. Síntesis de energía a través de la vía anaeróbica láctica



ATP: adenosín trifosfato; C. K.: ciclo de Krebs; CR: cadena respiratoria; GLU: glucosa; H₂O: agua; O₂: oxígeno.

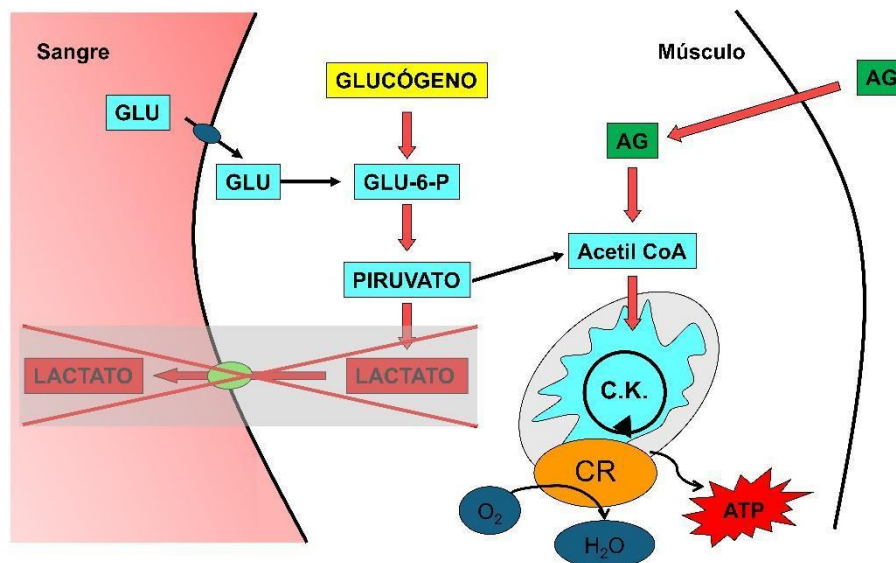
Fuente: Cadefau, 2024.

Papel de la lactato deshidrogenasa (LDH)

La LDH es un complejo enzimático que cataliza la reacción $\text{piruvato} \leftrightarrow \text{lactato}$. Existen cinco isoformas de LDH, cada una compuesta por cuatro subunidades con distinta afinidad por el piruvato o el lactato, lo que influye en la capacidad de conversión en distintos tejidos. En el músculo esquelético predomina la forma isoenzimática con alta afinidad por el piruvato (4M), que lo transforma rápidamente en lactato, mientras que en el músculo cardíaco predomina la forma con alta afinidad por el lactato (4H), que lo convierte en piruvato.

Durante el ejercicio de alta intensidad, predomina la conversión de piruvato en lactato. Una vez finalizado el esfuerzo, o cuando se reduce la intensidad, el lactato puede reconvertirse en piruvato si la disponibilidad de oxígeno lo permite, o bien trasladarse a otros tejidos para su utilización. Este traslado puede darse, por ejemplo, desde las fibras musculares de contracción rápida hacia las de contracción lenta.

Figura 4. Síntesis de energía a través de la vía aeróbica



ATP: adenosín trifosfato; AG: ácidos grasos; C. K.: ciclo de Krebs; CR: cadena respiratoria; GLU: glucosa; H₂O: agua; O₂: oxígeno.

Fuente: Cadefau, 2024.

Concepto de lactato como molécula «bifásica»

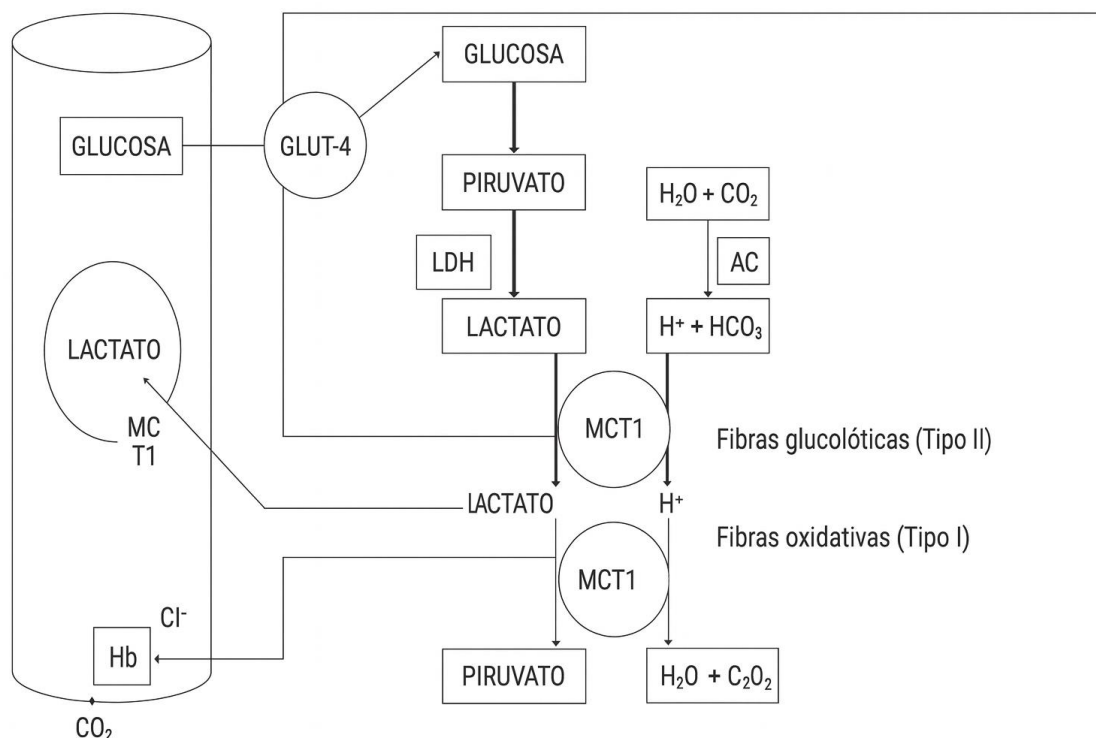
En reposo y durante ejercicios ligeros, el lactato se produce en cantidades moderadas y se utiliza de forma continua en tejidos como el corazón o las fibras musculares más oxidativas (tipo I).

En ejercicios de muy alta intensidad, la tasa de producción de lactato aumenta de forma pronunciada, superando transitoriamente la capacidad de aclaramiento. Como resultado, los niveles de lactato en sangre y en el músculo se elevan.

Perspectiva histórica sobre el lactato

Durante mucho tiempo, se asumió que el lactato era simplemente un marcador de fatiga y daño muscular. Esta visión comenzó a cambiar a partir de los estudios de George Brooks y otros investigadores, quienes demostraron el papel del lactato como combustible oxidativo, en especial en el miocardio y en las fibras musculares de tipo I. Además, la noción del *lactate shuttle* plantea que el lactato puede desplazarse entre distintos tejidos —como el músculo, el hígado, el cerebro o el corazón— para ser utilizado de manera eficiente.

Figura 5. Producción, transporte y utilización del lactato entre fibras musculares y su función en el equilibrio ácido-base durante el ejercicio



Fuente: elaboración propia.

Como podemos ver en la figura 5, la glucosa entra a la célula muscular a través del transportador GLUT-4 y es metabolizada por glucólisis hasta convertirse en piruvato. Cuando la demanda energética es alta o la capacidad oxidativa está limitada, el piruvato se reduce a lactato mediante la enzima lactato deshidrogenasa (LDH), lo que permite regenerar NAD^+ y mantener activa la glucólisis. Ese lactato, junto con protones (H^+), se exporta al espacio extracelular a través del transportador MCT4, propio de las fibras musculares glucolíticas (tipo II).

En el medio extracelular, el lactato puede ser captado por fibras musculares de tipo oxidativo (tipo I) gracias al transportador MCT1. Una vez dentro de estas fibras, la LDH lo reconvierte en piruvato, que puede ingresar a la mitocondria y oxidarse en presencia de oxígeno, integrándose al ciclo de Krebs y la cadena respiratoria.

También se representa el sistema tampón de bicarbonato, que ayuda a regular el pH. Los protones liberados durante la glucólisis se combinan con bicarbonato (HCO_3^-) y forman ácido carbónico (H_2CO_3), que luego se descompone en CO_2 y H_2O por acción de la anhidrasa carbónica (AC). El CO_2 se transporta por la sangre, una parte unida a la hemoglobina (Hb) y otra en forma de bicarbonato, gracias al intercambio de aniones Cl^- en los eritrocitos.

En conjunto, la figura muestra cómo las fibras musculares glucolíticas y oxidativas trabajan en red mediante el *lactate shuttle*, y cómo se activan mecanismos de tamponamiento para evitar la acidificación celular durante el ejercicio intenso.

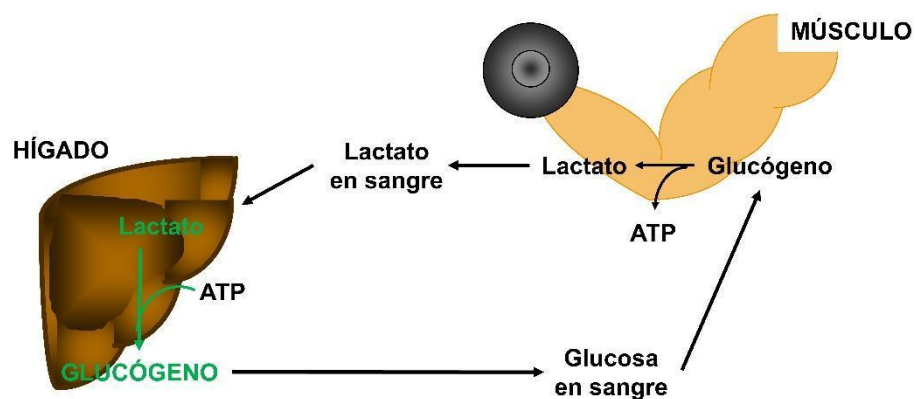
Órganos y tejidos clave en la producción y manejo del lactato

El lactato circula por la sangre y puede ser metabolizado o convertido nuevamente en glucosa. Entre los principales órganos y tejidos que participan en este proceso, se destacan los siguientes:

- **Músculo esquelético**

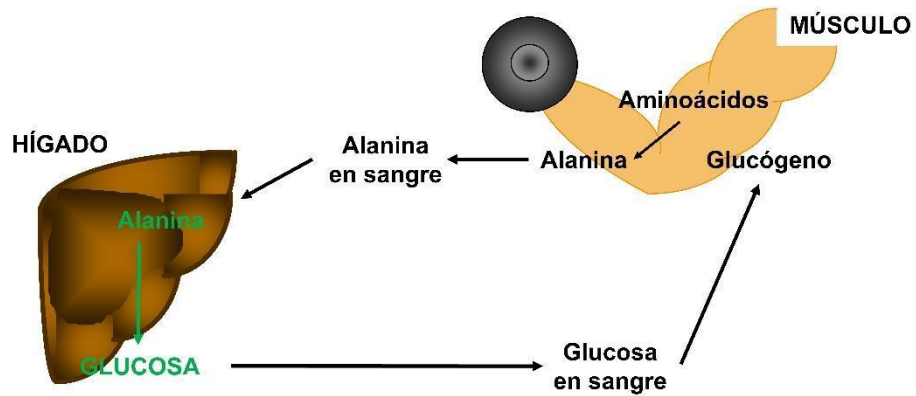
Es el principal generador de lactato durante el ejercicio de alta intensidad, especialmente a través de las fibras de tipo II (rápidas y glucolíticas). También puede actuar como consumidor de lactato durante esfuerzos de menor intensidad o en la fase de recuperación, particularmente mediante las fibras de tipo I (oxidativas).

Figura 6. Síntesis de glucosa (gluconeogénesis) a través del ciclo de Cori



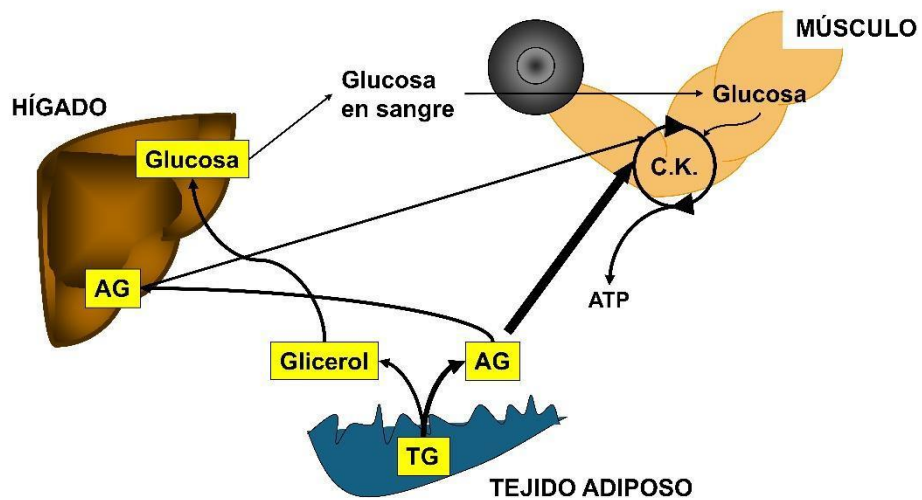
Fuente: Cadefau, 2024.

Figura 7. Síntesis de glucosa (gluconeogénesis) a través del ciclo de los aminoácidos



Fuente: Cadefau, 2024.

Figura 8. Síntesis de glucosa (gluconeogénesis) a través del ciclo de los triglicéridos



Fuente: Cadefau, 2024

- **Hígado y ciclo de Cori**

El hígado cumple un papel fundamental en la gluconeogénesis. El lactato proveniente del músculo esquelético y otros tejidos llega al hígado a través del torrente sanguíneo. Mediante el ciclo de Cori, el lactato se convierte en piruvato y

luego en glucosa, en un proceso que requiere energía (ATP), generada en gran parte por la fosforilación oxidativa hepática. La glucosa resultante puede regresar a la sangre y ser reutilizada por el músculo.

- **Corazón**

El músculo cardíaco utiliza el lactato de forma muy eficiente como sustrato energético. De hecho, se lo considera un «sumidero» de lactato, ya que lo oxida a través del ciclo de Krebs, contribuyendo así a su eliminación del torrente sanguíneo.

- **Riñones**

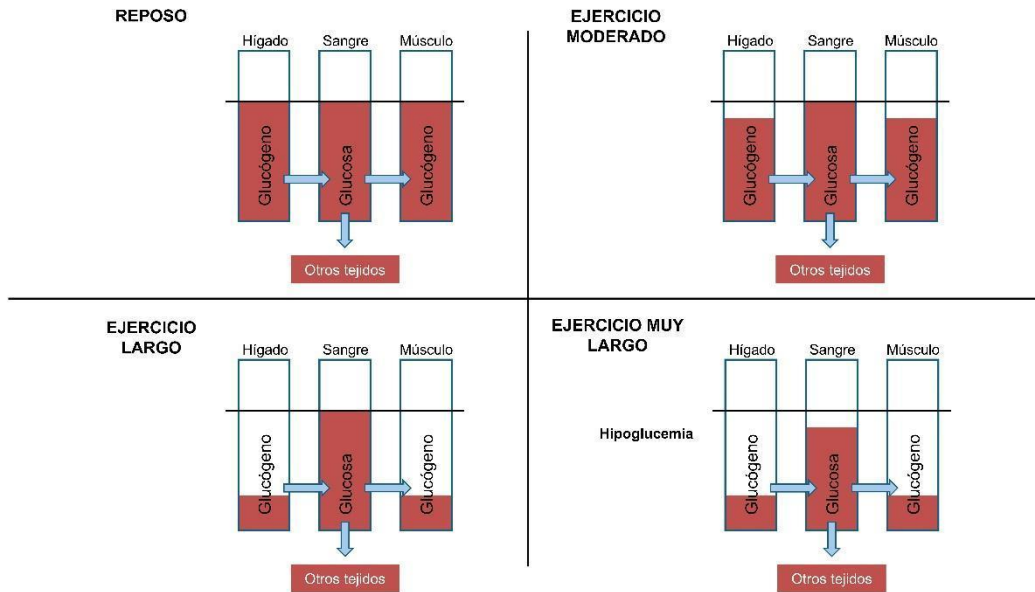
También participan en la gluconeogénesis a partir de lactato, especialmente en condiciones de ayuno prolongado o durante ejercicios intensos y sostenidos. Aunque su aporte suele ser menor en comparación con el del hígado, cumple un rol relevante en la regulación de la homeostasis del lactato.

Aclaramiento del lactato

El aclaramiento consiste en la reducción de la concentración de lactato en sangre y músculo. Este proceso se produce principalmente a través de su oxidación en tejidos activos, como el músculo cardíaco y las fibras musculares de tipo I. También interviene la gluconeogénesis en el hígado y, en menor medida, en los riñones. Además, una parte del lactato puede difundirse hacia distintos compartimentos del organismo. La eliminación por sudor y orina existe, pero tiene un impacto mínimo en el balance total.

Los niveles de lactato en sangre y músculo no solo dependen del aclaramiento, sino también de múltiples factores que influyen en su producción. Entre ellos, la intensidad y la duración del ejercicio son determinantes.

Figura 9. Dinámica de los almacenes de glucógeno hepático, glucosa sanguínea y glucógeno muscular en función de la duración del ejercicio



Fuente: Cadefau, 2024

Análisis de la prueba de lactato

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la prueba de lactato realizada a un deportista.

Deportista: FJR

Fecha: 10 de febrero de 2025

Introducción

El presente informe expone los resultados del análisis de una prueba de esfuerzo realizada en ciclistas, en la que se cuantificaron los niveles de lactato en sangre durante un protocolo incremental. El objetivo principal es identificar con precisión los umbrales de lactato (LTP1 y LTP2), fundamentales para la planificación del entrenamiento y la individualización de las zonas de carga fisiológica.

Para ello, se aplicaron distintos enfoques metodológicos reconocidos en la literatura científica, que permiten caracterizar la dinámica del lactato en función de la intensidad del ejercicio. Además, se implementó un ajuste polinómico de tercer grado con el objetivo de modelar la curva de lactato y facilitar su interpretación gráfica.

Los métodos empleados para la determinación de umbrales fueron los siguientes:

- **Log-log.** Transformación logarítmica de los datos de intensidad y lactato, que permite identificar cambios en la pendiente de la curva y facilita la localización de puntos de inflexión metabólica.

- **OBLA (*onset of blood lactate accumulation*)**: método que define umbrales fijos basados en concentraciones absolutas de lactato (2,0; 2,5; 3,0; 3,4 y 4,0 mmol/L), tradicionalmente asociadas con el inicio de una acumulación acelerada de lactato y el límite de la intensidad sostenible.
- **Bsln+**: procedimiento que determina el umbral a partir de un incremento constante sobre el valor basal de lactato, lo cual puede reflejar la capacidad individual de tamponamiento y producción de lactato.
- **Dmax**: calcula el punto de mayor distancia entre la curva de lactato y una línea recta trazada entre el primer y el último punto de la prueba, estimando así el umbral desde una perspectiva geométrica.
- **LTP (*lactate turn point*)**: identifica los puntos en los que se produce un cambio significativo en la tasa de aumento del lactato, comúnmente divididos en LTP1 (primer punto de inflexión) y LTP2 (inicio de acumulación exponencial).
- **LTratio**: método basado en la relación entre la intensidad del ejercicio y la concentración de lactato, que permite estimaciones más individualizadas de los umbrales funcionales.

Estos métodos ofrecen una visión complementaria del comportamiento del lactato durante un esfuerzo progresivo y pueden emplearse de forma conjunta para optimizar la prescripción del entrenamiento, mejorar el rendimiento y monitorizar la adaptación fisiológica del deportista.

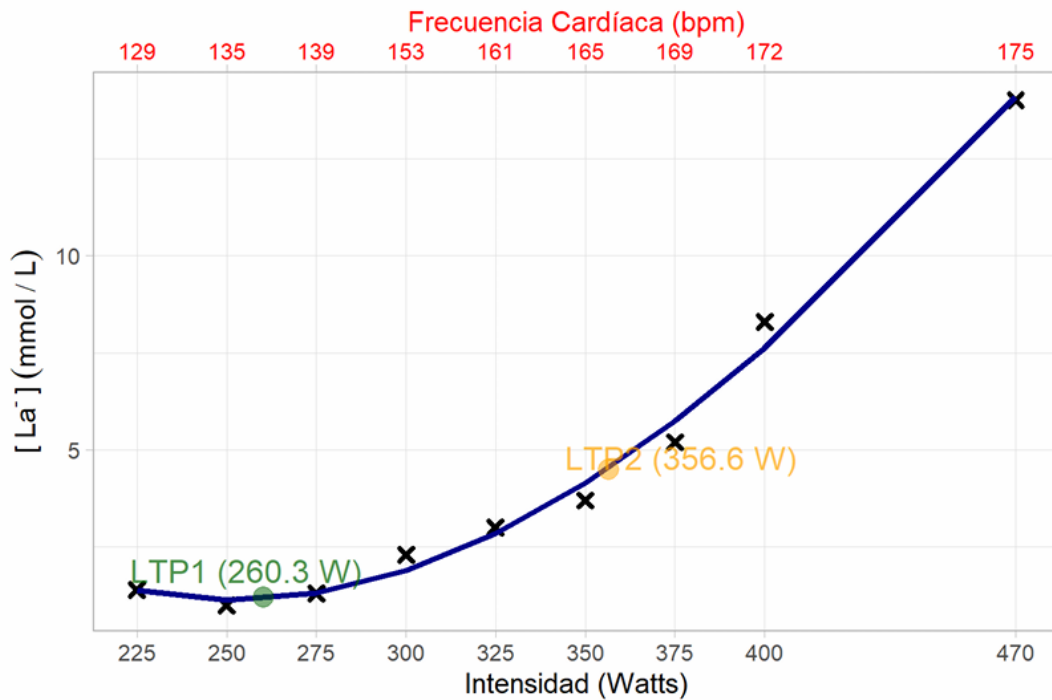
Ajuste del modelo polinómico

Se aplicó un modelo polinómico de tercer grado para describir la relación entre la intensidad del ejercicio y la concentración de lactato. A partir de este ajuste, se identificaron los umbrales correspondientes a los cambios de tendencia en la curva.

Figura 10. Puntos de umbral de lactato

Puntos de Umbral de Lactato (LTP1 y LTP2)

Ajuste Polinómico de 3er Grado



Fuente: elaboración propia

Figura 11. Análisis de la prueba de lactato

10/2/25, 12:52

Análisis Prueba de Lactato

```
# A tibble: 17 × 7
  method_category method      fitting  intensity lactate heart_rate plot
  <fct>             <fct>      <chr>      <dbl>   <dbl>   <dbl> <lis>
1 Log-log          Log-log    3rd degr... 253     1.1     141 <gg>
2 OBLA             OBLA 2.0   3rd degr... 303.    2       151 <gg>
3 OBLA             OBLA 2.5   3rd degr... 316.    2.5     153 <gg>
4 OBLA             OBLA 3.0   3rd degr... 328.    3       156 <gg>
5 OBLA             OBLA 3.5   3rd degr... 338.    3.5     158 <gg>
6 OBLA             OBLA 4.0   3rd degr... 347.    4       159 <gg>
7 Bsln+           Bsln + 0.5 3rd degr... 300.    1.9     150 <gg>
8 Bsln+           Bsln + 1.0 3rd degr... 313.    2.4     153 <gg>
9 Bsln+           Bsln + 1.5 3rd degr... 326.    2.9     155 <gg>
10 Dmax            Dmax       3rd degr... 353.    4.3     160 <gg>
11 Dmax            ModDmax    3rd degr... 365.    5.1     163 <gg>
12 Dmax            Exp-Dmax   Exponent... 375.    5.7     165 <gg>
13 Dmax            Log-Poly-ModDmax 3rd degr... 353.    4.3     161 <gg>
14 Dmax            Log-Exp-ModDmax Exponent... 376.    5.7     165 <gg>
15 LTP             LTP1       3rd degr... 260.    1.2     143 <gg>
16 LTP             LTP2       3rd degr... 357.    4.5     161 <gg>
17 LTratio         LTratio    B-Spline... 258     1.3     142 <gg>
```



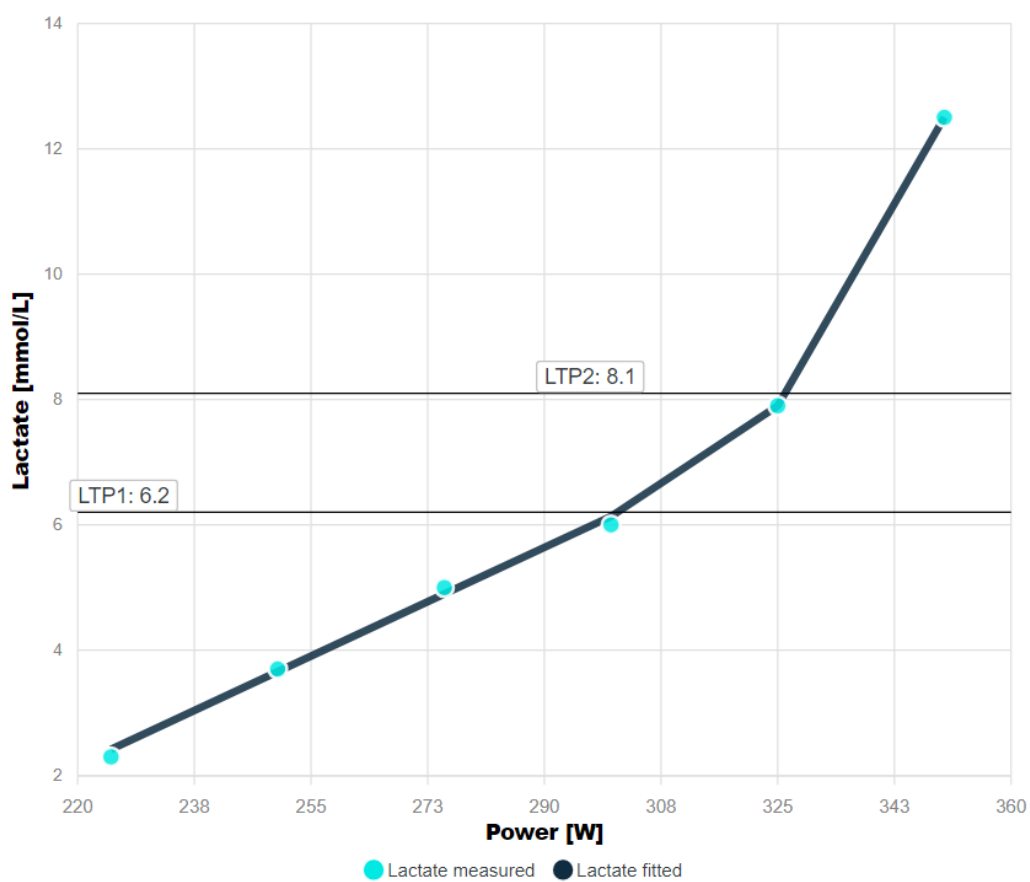
Comparación entre curvas de lactato

En la primera prueba, las concentraciones de lactato aumentaron con rapidez desde potencias relativamente bajas, lo que indica una activación predominante de fibras rápidas tipo II, alta actividad glucolítica y una capacidad oxidativa limitada. Esta combinación provoca que, para una misma carga externa, el metabolismo produzca lactato con mayor rapidez de la que puede aclararlo, de modo que los umbrales metabólicos se alcanzan a potencias menores y el pico de lactato ronda los $15 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$.

En cambio, en la segunda prueba, la curva de lactato se desplazó hacia la derecha y mostró valores absolutos claramente inferiores: el ciclista toleró potencias más altas antes de que el lactato se disparara, y el pico se situó en torno a $9 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. Esto refleja un perfil con mayor proporción de fibras lentas tipo I, elevada densidad capilar y mitocondrial, y una actividad enzimática oxidativa capaz de reutilizar o eliminar el lactato con mayor eficacia.

En resumen, el primer *test* corresponde a un fenotipo glucolítico, caracterizado por una elevada potencia anaeróbica y fatiga rápida, mientras que el segundo revela un fenotipo oxidativo, con mejor eficiencia aeróbica y mayor capacidad para sostener el esfuerzo sin una acumulación excesiva de lactato.

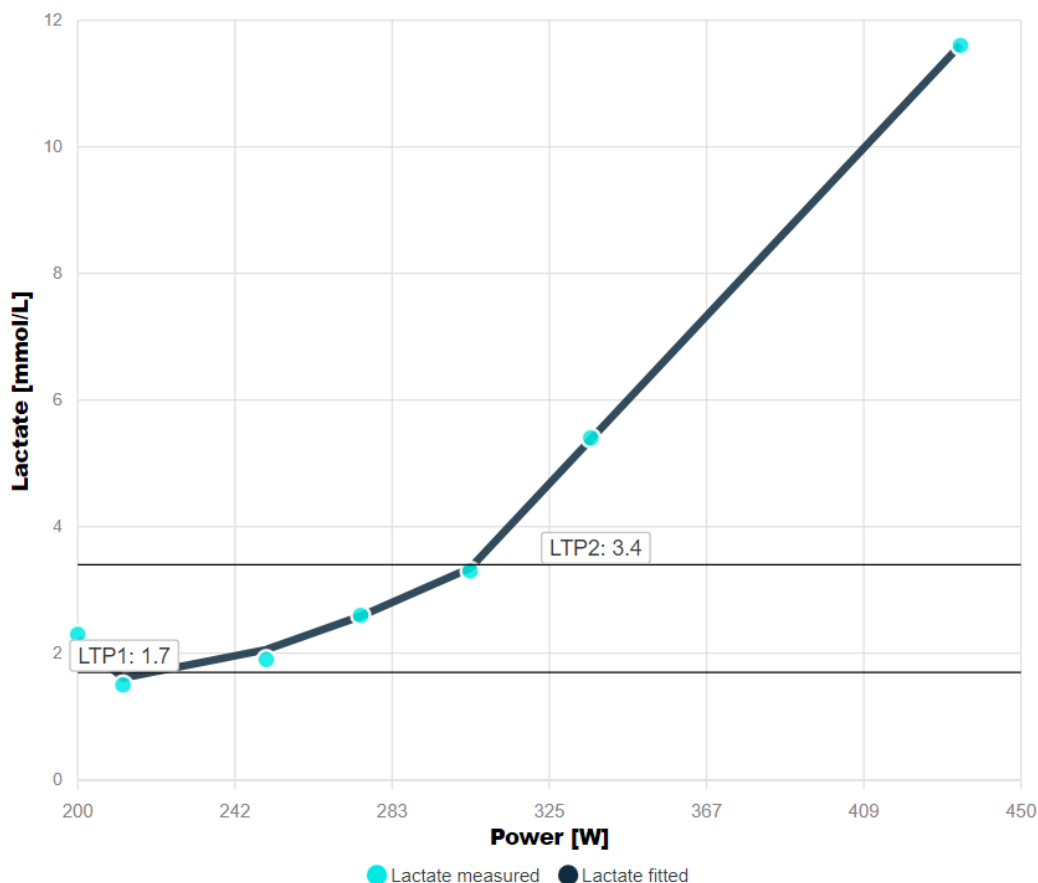
Figura 12. Curva de lactato ajustada y umbrales LTP1 y LTP2 – primera prueba



Fuente: elaboración propia

Figura 13. Curva de lactato ajustada y umbrales LTP1 y LTP2 – segunda prueba





Fuente: elaboración propia

Relación entre intensidad y producción de lactato

A medida que la intensidad del ejercicio aumenta, la demanda de ATP se incrementa de forma exponencial. Para cubrir esta necesidad energética, el músculo recurre a la vía anaeróbica (glucólisis rápida), lo que genera un aumento en la producción de lactato.

Por ejemplo, en un *sprint* de 100 metros, la explosión inicial depende casi por completo del sistema ATP-PCr (fosfágeno). Durante los primeros 10 segundos, los niveles de fosfocreatina pueden disminuir por debajo del 10 %. Sin embargo, conforme se prolonga el esfuerzo, la glucólisis anaeróbica se convierte en la vía predominante, produciendo cantidades importantes de lactato.

Duración e impacto en la acumulación de lactato

Los ejercicios breves (inferiores a 30 segundos) generan picos de lactato de forma muy rápida. En cambio, los esfuerzos de mayor duración, pero realizados a intensidades moderadas, pueden mantener niveles estables de lactato (entre 2 y 4 mmol/L) durante un período más prolongado. En pruebas de 400-800 metros en atletismo, se observa un pico muy alto de lactato al final de la carrera, reflejando la elevada contribución anaeróbica.



Ejercicio intermitente vs. continuo

En actividades intermitentes —como los deportes de equipo—, la producción de lactato puede ser muy elevada durante cada *sprint*, pero los períodos parciales de recuperación (como trotar o caminar) permiten un aclaramiento parcial del lactato acumulado.

En cambio, el ejercicio continuo realizado a una intensidad media-alta puede provocar un aumento progresivo de la concentración de lactato, que puede estabilizarse en un estado constante o continuar elevándose hasta alcanzar el agotamiento.

Nivel de entrenamiento y condición física

Adaptaciones metabólicas por entrenamiento

Un individuo adaptado mediante entrenamiento de resistencia presenta un aumento en la proporción de fibras de tipo I, junto con una mayor vascularización y un incremento tanto en el tamaño como en el número de mitocondrias. Esta mayor densidad mitocondrial se traduce en una mejor capacidad oxidativa y en una mayor actividad enzimática vinculada al ciclo de Krebs y a la cadena de transporte de electrones.

El incremento de la capacidad aeróbica permite que, a una determinada intensidad de ejercicio, la producción de lactato sea menor en comparación con una persona no entrenada, o bien que el lactato generado se elimine con mayor rapidez.

Además, el entrenamiento de resistencia aumenta la expresión y la actividad de los transportadores de lactato (MCT1 y MCT4), lo que facilita su movilización y consumo por fibras más oxidativas o por otros tejidos, como el corazón.

Umbral de lactato y capacidad de tolerancia

El término «umbral anaeróbico» o «umbral de lactato» se utiliza para describir la intensidad a la que la concentración de lactato en sangre comienza a aumentar de forma desproporcionada en comparación con intensidades menores.

Con el entrenamiento —en particular el continuo a ritmo moderado-alto y el entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT)—, este umbral se desplaza hacia intensidades más elevadas. Esto permite al deportista sostener esfuerzos más exigentes sin acumular cantidades excesivas de lactato.

Composición de fibras musculares

Las personas con mayor proporción de fibras de tipo II tienden a producir más lactato durante ejercicios de muy alta intensidad, aunque también cuentan con una mayor potencia anaeróbica.

Por el contrario, los individuos con predominio de fibras de tipo I presentan una mejor capacidad para oxidar lactato y una menor acumulación durante esfuerzos prolongados.

Interpretación de los niveles de lactato durante el ejercicio

Significado de Diferentes Concentraciones de Lactato

Las concentraciones de lactato, generalmente expresadas en mmol/L, pueden interpretarse en función del estado fisiológico.

- **Valores en reposo**

En reposo, los valores suelen encontrarse entre 0,5 y 2 mmol/L, dependiendo de factores como la dieta, el estado de ayuno o el nivel de estrés. Estos niveles reflejan la homeostasis basal del organismo en relación con la producción y el aclaramiento de lactato.

- **Ejercicio suave a moderado**

Durante el ejercicio suave a moderado, los valores se sitúan entre 2 y 4 mmol/L. En este rango, el organismo todavía puede manejar la producción de lactato mediante los procesos de oxidación y gluconeogénesis. Cuando la intensidad se mantiene en estas condiciones, se establece un equilibrio en el cual la producción y la eliminación de lactato permanecen balanceadas.

- **Ejercicio de alta intensidad**

En estas condiciones, el lactato se produce con mayor rapidez de la que puede eliminarse, lo que genera su acumulación. Tradicionalmente, se ha utilizado el valor de 4 mmol/L como referencia para determinar el umbral anaeróbico; sin embargo, en la actualidad se tiende a individualizar este umbral o a emplear métodos más avanzados, como las curvas de lactato o las pruebas escalonadas.

- **Niveles muy elevados**

Se observan en esfuerzos cortos y explosivos —como carreras de 400 a 800 metros en atletismo o series de alta intensidad en deportes de equipo—, con valores de 8 a 12 mmol/L o más.

Estos niveles reflejan un predominio marcado de la vía glucolítica y una gran perturbación del medio interno. Tras este tipo de esfuerzos, es común experimentar

fatiga intensa y dificultad para mantener la misma intensidad en la repetición siguiente.

Lactato y fatiga

Es importante subrayar que el lactato, por sí mismo, no es el único responsable de la fatiga. Aunque niveles elevados suelen correlacionarse con una disminución del rendimiento, la verdadera causa se relaciona también con la acumulación de iones hidrógeno (H^+), la consecuente disminución del pH (acidosis muscular), el agotamiento de las fuentes energéticas, la alteración en los puentes de actina-miosina y la posible disfunción del sistema nervioso central. En este sentido, el lactato debe entenderse como un biomarcador de la alta demanda anaeróbica, pero no como el único culpable de la fatiga.

Relación con los umbrales metabólicos

La interpretación de la curva de lactato permite identificar dos puntos de referencia fisiológicos, que marcan la transición entre diferentes zonas de intensidad del ejercicio.

- **Umbral aeróbico (VT1)**

Suele situarse en torno a concentraciones de lactato cercanas a 2 mmol/L, aunque este valor puede variar entre individuos. En este nivel se observa un ligero incremento de la ventilación y el inicio de una mayor utilización de hidratos de carbono en comparación con las grasas.

- **Umbral anaeróbico (VT2 o umbral de lactato)**

Se caracteriza por una acumulación más marcada de lactato en sangre, que en muchas personas supera los 4 mmol/L, aunque este valor también puede oscilar de forma individual. Este umbral representa una referencia de transición hacia esfuerzos en los que predomina cada vez más el metabolismo anaeróbico. A intensidades por encima de este punto, la fatiga aparece con relativa rapidez.

Importancia práctica

Conocer el umbral anaeróbico de un deportista permite diseñar entrenamientos específicos según la intensidad de trabajo:

- Los entrenamientos realizados **por debajo del umbral** mejoran la base aeróbica y la capacidad de sostener esfuerzos a intensidades submáximas.

- Los entrenamientos llevados a cabo **en torno al umbral** aumentan la tolerancia al lactato y retrasan la aparición de la fatiga.
- Los entrenamientos efectuados **por encima del umbral** potencian la capacidad anaeróbica y la habilidad de sostener intensidades máximas.

Curvas de lactato y pruebas de laboratorio

Normalmente, se realizan pruebas incrementales en las que se extrae una gota de sangre del lóbulo de la oreja o del dedo a diferentes intensidades, con el fin de confeccionar una curva de lactato. Esta curva permite determinar puntos de inflexión (umbrales) y establecer zonas de entrenamiento personalizadas.

Por otro lado, los umbrales ventilatorios (VT1 y VT2) se obtienen en una prueba de esfuerzo con intensidades crecientes, analizando el consumo de oxígeno y la producción de CO₂. El VT1 suele coincidir con el umbral aeróbico (aproximadamente 2 mmol/L de lactato), mientras que el VT2 corresponde al umbral anaeróbico (alrededor de 4 mmol/L de lactato).

Importancia del lactato en diferentes disciplinas deportivas

Deportes de resistencia vs. deportes de potencia

El papel del lactato varía según el tipo de disciplina y las demandas fisiológicas.

- **Deportes de resistencia** (maratón, ciclismo de ruta, triatlón, natación de larga distancia)

El objetivo principal es sostener el esfuerzo durante períodos prolongados. En este contexto, el lactato funciona como un indicador de la intensidad del ejercicio y de la eficiencia aeróbica. Los atletas de resistencia buscan retrasar al máximo su acumulación y mejorar la capacidad de utilizarlo como sustrato energético. Un aclaramiento más eficiente del lactato permite mantener un ritmo más alto durante más tiempo. Los entrenamientos de umbral son fundamentales para aumentar la tolerancia y la capacidad de reciclaje de lactato.

- **Deportes de potencia y velocidad** (sprint, halterofilia, *CrossFit*, deportes de equipo con acciones explosivas)

En estas disciplinas, la producción de lactato puede ser muy elevada en cortos intervalos, debido a la gran demanda de ATP procedente de la glucólisis anaeróbica. El deportista no solo debe producir altas tasas de energía, sino también tolerar y amortiguar la acidez intramuscular derivada de este metabolismo. En deportes de equipo como fútbol, baloncesto o balonmano, donde se encadenan esfuerzos

intermitentes de alta intensidad, la capacidad de eliminar lactato y recuperarse entre *sprints* resulta decisiva para el rendimiento global.

- **Interdisciplinariedad**

Existen numerosos deportes que combinan componentes de resistencia y potencia —como el remo, el boxeo, las artes marciales o las carreras de medio fondo—, en los cuales la gestión del lactato resulta fundamental tanto para sostener acciones de alta intensidad como para favorecer la recuperación entre esfuerzos.

Adaptaciones específicas a la producción y utilización del lactato

Según el tipo de estímulo aplicado en el entrenamiento, el organismo desarrolla distintas adaptaciones relacionadas con la producción y el uso del lactato. A continuación, se presentan las más relevantes.

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

Este método, muy difundido en las últimas décadas, consiste en alternar períodos de ejercicio a intensidades cercanas al VO_2 máx —o incluso superiores— con intervalos de recuperación activa o pasiva. El HIIT mejora la capacidad del músculo para tolerar concentraciones elevadas de lactato y aclararlo con mayor eficiencia. Además, favorece adaptaciones como el aumento de la densidad mitocondrial y la capilarización muscular.

- **Entrenamiento de resistencia de larga duración**

A intensidades moderadas y sostenidas se desarrollan las vías aeróbicas, con un incremento en la actividad de las enzimas oxidativas. Esto favorece un uso más eficiente de las grasas y una mejor gestión del lactato producido, gracias a la mayor capacidad de oxidarlo en la mitocondria.

Este tipo de entrenamiento eleva de manera progresiva el umbral anaeróbico, lo que permite sostener intensidades más altas sin que se produzca una acumulación excesiva de lactato.

- **Entrenamiento de fuerza/hipertrofia**

Aunque el lactato no suele ser la métrica principal en rutinas de musculación, se produce en cantidades significativas cuando se realizan series de repeticiones relativamente altas (8-12) con descansos cortos. Este tipo de estímulo puede inducir adaptaciones en la capacidad de tamponamiento muscular y en el reclutamiento de fibras, lo que indirectamente mejora la tolerancia al lactato.

Además de estas adaptaciones inducidas por el entrenamiento, investigaciones recientes han mostrado que el lactato puede actuar como molécula de señalización, influyendo en rutas de regulación génica y en la expresión de factores de transcripción vinculados con la adaptación muscular. De este modo, lejos de ser un simple «subproducto», el lactato participa en la remodelación y comunicación celular que tienen lugar tras entrenamientos de alta intensidad.

Estrategias de entrenamiento y control del lactato

Existen diversas herramientas y métodos que permiten evaluar, monitorizar y optimizar la producción, la tolerancia y el aclaramiento del lactato en el entrenamiento y la competición. Entre las principales estrategias se encuentran las siguientes:

- **Pruebas de laboratorio y de campo**

En disciplinas de resistencia, se realizan pruebas incrementales —en cinta rodante, ergómetro de ciclismo, entre otros— tomando muestras de lactato en distintos estadios de intensidad. Estos datos permiten determinar el umbral de lactato y el consumo máximo de oxígeno ($VO_{2\text{máx}}$). En disciplinas de potencia y deportes de equipo, se emplean pruebas intermitentes o específicas de la modalidad —como los test de pista en atletismo— para valorar la producción y la tolerancia al lactato.

- **Monitoreo en competición**

Cada vez es más habitual el uso de analizadores portátiles que permiten medir lactato directamente en el lugar de entrenamiento o durante la competencia. Con esta información, es posible ajustar las cargas entre series, controlar la recuperación y planificar estrategias de *pacing* o dosificación del esfuerzo en pruebas de resistencia.

- **Aplicación de intervalos largos y cortos**

Los intervalos largos (2 a 6 minutos) son útiles para entrenar la tolerancia y la eliminación del lactato, así como para desplazar el umbral anaeróbico. En cambio, los intervalos cortos (20 a 60 segundos) se orientan a mejorar la potencia anaeróbica y la capacidad de producir y manejar picos elevados de lactato.

- **Recuperación activa**

Tras esfuerzos intensos, actividades ligeras como el trote suave favorecen la circulación sanguínea y el consumo de lactato por parte de los músculos menos fatigados. Este mecanismo permite un aclaramiento más rápido en comparación con la recuperación completamente pasiva.

Conclusión sobre el rol del lactato en diferentes disciplinas

La influencia del lactato en el rendimiento deportivo depende en gran medida del perfil de la disciplina y de la capacidad del atleta para producirlo y utilizarlo de manera eficiente. En los deportes de resistencia, el desafío principal es retrasar su acumulación y optimizar los mecanismos de aclaramiento. En cambio, en los deportes de potencia y en aquellos que implican esfuerzos intermitentes, el rendimiento se relaciona con la capacidad de sostener ráfagas explosivas con una elevada producción de lactato y recuperarse en períodos breves.

Comprender la fisiología del lactato, su producción y su destino proporciona a entrenadores y deportistas herramientas valiosas para diseñar programas de entrenamiento personalizados y efectivos, orientados a potenciar tanto las cualidades aeróbicas como las anaeróbicas, así como la eficiencia en la utilización de los distintos sustratos energéticos.

Conclusiones

El lactato es un metabolito que participa activamente en la fisiología del ejercicio. Se produce principalmente a partir del piruvato en situaciones de alta demanda energética y está estrechamente vinculado a la glucólisis anaeróbica, aunque incluso en condiciones aeróbicas existe una producción basal. Lejos de ser un simple producto de desecho, funciona como combustible para órganos como el corazón y las fibras musculares oxidativas, y cumple un papel en la comunicación intertisular, como se observa en el ciclo de Cori en el hígado.

Los niveles de lactato durante el ejercicio dependen de factores como la intensidad y la duración del esfuerzo, la composición de fibras musculares y, especialmente, el estado de entrenamiento del deportista. Una interpretación adecuada de estos valores, tanto en reposo como durante la actividad, permite estimar los umbrales metabólicos (aeróbico y anaeróbico), que son útiles para planificar el entrenamiento, prevenir la fatiga excesiva y optimizar el rendimiento.

En los deportes de resistencia, el objetivo principal es retrasar la acumulación excesiva de lactato. En los de alta intensidad y potencia, en cambio, adquiere importancia la capacidad de tolerar concentraciones elevadas y de aclararlas con eficacia. Metodologías como el entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT) y el trabajo fraccionado contribuyen a mejorar tanto las cualidades aeróbicas como las anaeróbicas relacionadas con la producción y el manejo del lactato.

En síntesis, el lactato es un indicador metabólico que ofrece información valiosa sobre el rendimiento deportivo. Conocer sus mecanismos de producción, utilización y regulación permite ajustar cargas de entrenamiento, diseñar estrategias de

competición y orientar la recuperación y la nutrición en la práctica deportiva moderna.

Medición y aplicaciones prácticas

Introducción

El interés por medir los niveles de lactato de forma precisa y en tiempo real ha aumentado de manera considerable en los últimos años, debido a su utilidad como indicador fisiológico en la monitorización del rendimiento deportivo. El lactato, lejos de ser solo un subproducto metabólico, se emplea como marcador de la demanda energética de carácter anaeróbico y de los ajustes fisiológicos que ocurren durante el ejercicio.

Tradicionalmente, la evaluación del lactato se realizaba en laboratorios especializados mediante la extracción intermitente de muestras sanguíneas. No obstante, la evolución tecnológica y la miniaturización de sensores han permitido el desarrollo de dispositivos portátiles y *wearables*, que facilitan mediciones más frecuentes y, en algunos casos, casi en tiempo real. Esto ha cambiado la forma en que entrenadores, médicos deportivos y deportistas gestionan los programas de entrenamiento y recuperación, contribuyendo también a la prevención de lesiones y del sobreentrenamiento.

A continuación, se presentan los métodos tradicionales y las tecnologías avanzadas de medición, junto con la aplicación práctica de los datos de lactato en la optimización del rendimiento, la personalización de cargas y la monitorización de la fatiga.

Métodos tradicionales de medición del lactato

Pruebas de laboratorio y de campo

La medición del lactato se realizaba históricamente en laboratorios mediante equipamiento especializado. Sin embargo, en la práctica deportiva resulta necesario recurrir con frecuencia a pruebas de campo, que permiten reflejar de manera más directa las condiciones reales de la competencia o del entrenamiento.

- **Pruebas de laboratorio**
 - **Análisis en reposo y durante ejercicios controlados.** Se realizan pruebas progresivas en cinta rodante o en ergómetros de ciclismo bajo la supervisión de un profesional. A intervalos regulares —por ejemplo, cada 3 a 5 minutos— se extrae una muestra de sangre

capilar, generalmente del lóbulo de la oreja o del dedo, para medir la concentración de lactato.

- **Precisión y control de variables.** El entorno de laboratorio permite un control estricto de la temperatura, la humedad y el protocolo de esfuerzo, lo que mejora la exactitud de la medición. Además, estas pruebas pueden integrarse con el registro del consumo de oxígeno (VO_2) y de la frecuencia cardíaca, generando una curva que relaciona intensidad, frecuencia cardíaca, VO_2 y lactato.
- **Interpretación de curvas de lactato.** Esta metodología se utiliza para determinar los umbrales metabólicos (aeróbico y anaeróbico), así como la potencia o velocidad asociadas al *lactate threshold*. La información obtenida resulta útil para planificar zonas de entrenamiento personalizadas.

- **Pruebas de campo**

- **Test escalonados en pista o rutas definidas.** Se pueden realizar en una pista de atletismo, donde el deportista incrementa progresivamente la velocidad cada 1 o 2 vueltas, mientras se toman muestras de lactato en cada escalón de intensidad.
- **Test de Conconi adaptados.** Aunque el test de Conconi se centra principalmente en la frecuencia cardíaca, se ha adaptado para incluir la medición de lactato, lo que permite correlacionar de manera más directa la concentración en sangre con la velocidad de carrera o la potencia en ciclismo.

En comparación con las pruebas de laboratorio, estas evaluaciones ofrecen la ventaja de una mayor especificidad del gesto deportivo y una validez ecológica superior. No obstante, presentan la limitación de un menor control de las variables externas —como el viento, la temperatura o la inclinación del terreno—, lo que puede introducir cierta variabilidad en la medición.

Ventajas de los métodos tradicionales

Los métodos tradicionales de medición del lactato presentan varias fortalezas. En primer lugar, ofrecen una alta fiabilidad, ya que han sido ampliamente validados a lo largo de décadas de investigación. Además, permiten realizar mediciones paralelas: junto con la concentración de lactato es posible analizar el intercambio gaseoso, midiendo gases espirados (VO_2 , VCO_2), frecuencia cardíaca, consumo máximo de oxígeno y otras variables fisiológicas. Finalmente, disponen de referencias normativas bien establecidas —tablas, protocolos y zonas de referencia

basadas en estudios previos— que facilitan la comparación y la interpretación de los resultados.

Limitaciones de los métodos tradicionales

Entre las principales limitaciones de los métodos tradicionales destaca su carácter discontinuo, ya que la medición del lactato requiere la extracción de sangre en momentos determinados, lo que interrumpe brevemente la prueba. También existe una fuerte dependencia del equipamiento y del personal especializado: el análisis de laboratorio exige un analizador de lactato, reactivos, técnicos entrenados y condiciones controladas, lo que restringe su accesibilidad. A esto se suma el costo, dado que la infraestructura de laboratorio y el equipamiento especializado pueden resultar onerosos, especialmente para equipos o federaciones con presupuestos más reducidos.

Ventajas y limitaciones de las pruebas de laboratorio y de campo

Las pruebas de laboratorio ofrecen un control preciso tanto de la intensidad como de las variables ambientales, lo que asegura una alta validez interna al minimizar factores externos que puedan alterar la medición. Además, permiten realizar análisis complementarios, como pruebas de intercambio gaseoso o electrocardiogramas. No obstante, presentan la limitación de una menor validez ecológica, ya que el ambiente de laboratorio no siempre representa las condiciones reales de competencia —como las superficies, el clima o la presión psicológica—. También suponen un coste económico y de tiempo considerable, debido al uso de instalaciones específicas y a la necesidad de personal especializado.

Por su parte, las pruebas de campo se caracterizan por un mayor realismo, ya que el deportista es evaluado en su propio entorno y con el equipamiento habitual de su disciplina —zapatillas de competición, bicicleta de ruta, entre otros—. Además, facilitan la evaluación de grupos grandes de forma simultánea, siempre que la logística de toma de muestras y cronometraje esté bien organizada. Sin embargo, su principal limitación radica en la influencia de factores no controlables, como el viento, el desnivel, el clima o el estado del terreno. También presentan una mayor complejidad logística, pues controlar la intensidad escalonada o mantener la velocidad objetivo puede resultar más difícil que en un ergómetro de laboratorio.

Tecnologías avanzadas para la medición del lactato

Dispositivos portátiles y *wearables*

La innovación tecnológica de los últimos años ha permitido el desarrollo de analizadores de lactato portátiles y, más recientemente, de sensores no invasivos que buscan medir la concentración de lactato en tiempo real.

- **Analizadores portátiles de sangre capilar**

Estos dispositivos funcionan mediante tiras reactivas en las que se deposita una gota de sangre obtenida del dedo o del lóbulo de la oreja. La reacción enzimática con la lactato oxidasa genera una señal electroquímica que se traduce en la concentración de lactato. Entre los modelos más utilizados se encuentran Lactate Pro, Accutrend, Lactate Scout y Lactate Plus, entre otros.

La precisión es, en general, aceptable para el uso deportivo, con un margen de error que suele situarse entre $\pm 0,2$ y $0,4$ mmol/L, dependiendo del dispositivo y de las condiciones de medición. Sus principales ventajas son el tamaño compacto, la rapidez —con resultados disponibles en 5 a 15 segundos— y el costo relativamente bajo por prueba, limitado al precio de las tiras reactivas. Como limitación, sigue tratándose de un método intermitente, ya que requiere una punción capilar en cada medición, lo que dificulta realizar tomas muy frecuentes durante una misma sesión.

- **Sensores de sudor y parches *wearables***

Estos dispositivos detectan la concentración de lactato en el sudor mediante biosensores electroquímicos. El lactato presente reacciona con enzimas específicas y genera corrientes eléctricas que pueden medirse, lo que permite obtener estimaciones de la concentración. Su objetivo es ofrecer una medición continua o semidependiente en tiempo real, evitando las punciones repetidas necesarias en los métodos tradicionales.

Entre sus ventajas potenciales se encuentran la mayor comodidad para el deportista y la posibilidad de registrar la evolución del lactato a lo largo de toda la sesión de entrenamiento o competición. Sin embargo, presentan desafíos importantes: el sudor contiene una concentración de lactato inferior a la sanguínea y su composición varía en función de factores como la tasa de sudoración, la hidratación o la temperatura ambiental. Estas variaciones dificultan la calibración y la correlación precisa con los niveles en sangre.

- **Otros desarrollos tecnológicos**

Además de los analizadores portátiles y los parches *wearables*, existen líneas de investigación que exploran nuevas formas de medir el lactato de manera no invasiva:

- **Medición no invasiva con espectroscopia infrarroja.** Investigaciones en curso buscan analizar la concentración de lactato en sangre mediante técnicas de luz infrarroja cercana (NIRS). Sin embargo, estos métodos se encuentran todavía en fase experimental y afrontan retos

como la variabilidad interindividual, la interferencia de la pigmentación de la piel y la calibración en condiciones de esfuerzo.

- **Dispositivos integrados en ropa inteligente.** Algunos prototipos incorporan sensores en camisetas o brazaletes con el objetivo de lograr una medición constante y discreta. No obstante, su fiabilidad en el deporte de alto rendimiento aún no ha sido confirmada.

Precisión y confiabilidad de los nuevos dispositivos

La fiabilidad de los sistemas de medición de lactato no invasivos depende de múltiples factores. En primer lugar, la calibración es un aspecto fundamental, ya que muchos de estos dispositivos requieren ajustes previos o revisiones periódicas para evitar lecturas erróneas. A ello se suma la variabilidad fisiológica: la concentración de lactato en el sudor no siempre refleja de manera fiel los niveles sanguíneos, pues la correlación puede verse modificada por la tasa de sudoración, la temperatura ambiental o el pH local de la piel. Además, en condiciones reales de práctica deportiva, los movimientos y artefactos externos pueden afectar las mediciones, ya que el sudor puede evaporarse, mezclarse con agua en deportes acuáticos o verse alterado por el roce de la ropa.

En la mayoría de los estudios, los sensores de sudor se comparan con los analizadores portátiles de sangre capilar, considerados el estándar práctico en el entorno deportivo. Las investigaciones indican que la correlación presenta diferencias promedio que oscilan entre $\pm 0,5$ y $\pm 1,5$ mmol/L, lo cual resulta excesivo para aplicaciones en las que se requieren mediciones precisas de umbrales.

De cara al futuro, la miniaturización de los sensores y la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial para el filtrado de señales y el modelado de datos podrían mejorar de forma significativa la confiabilidad de estos dispositivos. Es posible que, en un futuro cercano, se disponga de plataformas combinadas capaces de registrar no solo el lactato, sino también la frecuencia cardíaca, la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) y otros parámetros relevantes para la monitorización del rendimiento deportivo.

Aplicación de los datos de lactato en el entrenamiento

Una vez obtenidas las mediciones, ya sea mediante métodos tradicionales o con tecnologías avanzadas, el desafío consiste en interpretar y aplicar esos datos de manera adecuada para optimizar el rendimiento deportivo y preservar la salud del deportista.

Personalización de cargas y recuperación: determinación de zonas de entrenamiento

A partir de los umbrales de lactato es posible establecer zonas de entrenamiento específicas, como las propuestas por Pallarés y Morán-Navarro (2012). Un ejemplo de esta clasificación incluye Z1 (<2 mmol/L), Z2 (2-3 mmol/L), Z3 (3-4 mmol/L) y así sucesivamente. Estas zonas permiten diseñar sesiones orientadas a objetivos concretos y ajustar las cargas de trabajo de manera más precisa. De este modo, se pueden programar entrenamientos dirigidos.

Tabla 1. Determinación de zonas de entrenamiento según concentración de lactato

Zona	Nombre	[Lactato] aproximada	Objetivo fisiológico principal
Z0	Regenerativa	<1 mmol/L	Recuperación entre estímulos; facilita la homeostasis y promueve el descanso activo.
Z1	Umbral aeróbico	1–2 mmol/L	Mejorar la eficiencia aeróbica y del metabolismo oxidativo.
Z2	Umbral anaeróbico / transición aeróbico-anaeróbico	2–4 mmol/L	Incrementar la capacidad para mantener esfuerzos prolongados aeróbicos.
Z3	Consumo máximo de oxígeno	4–8 mmol/L	Aumentar el VO ₂ máx y la tolerancia al esfuerzo cercano al máximo consumo de oxígeno.
Z4	Capacidad anaeróbica	8–14 mmol/L	Mejora de la tolerancia al lactato; capacidad para sostener esfuerzos de alta intensidad.
Z5	Potencia anaeróbica láctica	Máximo lactato tolerable	Estimular la producción energética vía glucólisis rápida y mejorar el reciclaje de lactato
Z6	Potencia anaeróbica aláctica	No dependiente del lactato	Aumentar la capacidad de esfuerzo explosivo basado en ATP-PCr (sin acumulación significativa de lactato).

Fuente: elaboración propia

Anexo

Modelo trifásico de Skinner y McLellan: base fisiológica y correspondencia con las zonas de García Pallarés y Morán-Navarro

El modelo trifásico de Skinner y McLellan (1980) organiza la intensidad del ejercicio en tres dominios con significado fisiológico bien definido, delimitados por dos transiciones detectables a través de la ventilación y/o la dinámica del lactato.

En la fase I (dominio moderado, por debajo del primer umbral ventilatorio o de lactato: VT1/LT1), el organismo alcanza estados estables y sostenibles. La ventilación aumenta de forma proporcional al consumo de oxígeno, la concentración de lactato sanguíneo se mantiene cerca del nivel basal o con incrementos mínimos, y el equilibrio ácido-base se preserva sin necesidad de hiperventilación compensatoria. Predomina la oxidación mitocondrial de ácidos grasos y carbohidratos, con una elevada dependencia de la reoxidación de NADH en la cadena respiratoria y una baja tasa glucolítica neta. La cinética del VO_2 es rápida y la percepción del esfuerzo se sitúa en niveles bajos a moderados, lo que permite acumular grandes volúmenes de trabajo con un estrés metabólico limitado. Este entorno favorece la capilarización, el aumento de la densidad mitocondrial y la mejora de la eficiencia mecánica.

En la fase II (dominio pesado o de transición, entre VT1/LT1 y VT2/LT2), el lactato sanguíneo se eleva de manera sostenida debido al aumento de la tasa glucolítica y a la liberación neta de lactato desde el músculo hacia la circulación. Sin embargo, aún pueden alcanzarse estados cuasi estables durante esfuerzos de duración moderada, siempre que el aclaramiento compense parcialmente la producción. La ventilación se acelera por la mayor carga de CO_2 procedente del tamponamiento de protones, y aparece el denominado componente lento del VO_2 , que refleja modificaciones en el reclutamiento de unidades motoras y en la eficiencia contráctil. El pH arterial desciende de forma moderada, el bicarbonato se consume progresivamente y se intensifica la activación simpática. Desde el punto de vista funcional, esta zona resulta determinante para desplazar los umbrales hacia intensidades más altas, mejorar la tolerancia al flujo de lactato y protones, y optimizar la economía a ritmos competitivos.

En la fase III (dominio severo, por encima de VT2/LT2), la homeostasis deja de ser sostenible: el VO_2 asciende hacia su valor máximo, el lactato se acumula de forma continua y la ventilación adopta un patrón de hiperventilación compensatoria. La tolerancia a este dominio es limitada en el tiempo y depende de factores como la capacidad de tamponamiento, la resíntesis de fosfocreatina y la resistencia al estrés neuromuscular. El trabajo realizado en esta zona genera adaptaciones centrales y periféricas de gran magnitud, entre ellas el aumento del $\text{VO}_{2\text{máx}}$, la mejora de la potencia o la velocidad asociadas al $\text{VO}_{2\text{máx}}$ y ajustes en el reclutamiento de fibras de contracción rápida.

La traslación práctica de estos dominios al entrenamiento basado en la frecuencia cardíaca se optimiza cuando las zonas se anclan a umbrales individuales. El enfoque de García Pallarés y Morán-Navarro (2012) se fundamenta precisamente en este principio, evitando porcentajes fijos de la frecuencia cardíaca máxima y definiendo las zonas en relación con los valores de frecuencia cardíaca correspondientes a VT1 y VT2.

De este modo, la zona 1 se sitúa por debajo de la frecuencia cardíaca en VT1 e incluye el trabajo regenerativo y la resistencia aeróbica extensiva, donde el control de la deriva cardiovascular y de la temperatura asegura que la intensidad se mantenga en el dominio moderado.

La zona 2 abarca la franja inmediatamente inferior y en torno a la frecuencia cardíaca de VT1, siendo útil para consolidar el uso predominante de vías oxidativas, aumentar el volumen de trabajo y mejorar progresivamente la economía sin invadir el dominio de transición.

La zona 3 se corresponde con el tramo intermedio entre las frecuencias cardíacas de VT1 y VT2. En este rango se ubica la resistencia aeróbica intensiva o *tempo* y el trabajo específico de umbral, donde el lactato se eleva por encima del basal, pero puede estabilizarse de forma transitoria. El entrenamiento en esta zona desplaza los umbrales, mejora la tolerancia al flujo glucolítico y optimiza la eficiencia a ritmos próximos a la competición.

La zona 4 se sitúa en el entorno de la frecuencia cardíaca de VT2 y en su margen inmediatamente superior. Representa estímulos cercanos al límite de estabilidad, donde la ventilación ya muestra signos claros de compensación. Es adecuada para esfuerzos fraccionados de duración media que incrementan la potencia o velocidad asociadas al consumo máximo de oxígeno.

La zona 5 comprende intensidades claramente superiores a la frecuencia cardíaca de VT2, en el dominio severo, con duraciones necesariamente breves y una orientación específica hacia el VO_2 máx y la capacidad de sostener ritmos de alta exigencia.

Esta gradación por zonas, anclada a VT1 y VT2, permite mapear el trabajo de potencia o de ritmo de campo sin perder el vínculo fisiológico que garantiza la especificidad del estímulo. Para implementarla con fiabilidad, conviene estimar VT1 y VT2 mediante una prueba incremental estandarizada y trasladar las frecuencias cardíacas obtenidas a la planificación cotidiana. Cuando no se dispone de laboratorio, pueden aplicarse aproximaciones de campo: la capacidad de hablar con fluidez y mantener conversaciones completas indica intensidades por debajo de VT1, mientras que la pérdida de esta fluidez y la aparición de hiperventilación progresiva

sugieren el entorno de VT2. En todos los casos, el seguimiento combinado de la carga externa (potencia o ritmo) y la carga interna (frecuencia cardíaca, percepción del esfuerzo y, cuando sea posible, lactato capilar) ofrece un control más preciso de la intensidad. La reevaluación periódica de los umbrales resulta indispensable, ya que factores como la adaptación, la temperatura, la hidratación, la altitud o el estado de glucógeno pueden modificar su localización funcional.

En síntesis, el modelo trifásico aporta la base fisiológica que justifica el anclaje de las zonas de entrenamiento a los umbrales individuales. La propuesta de García Pallarés y Morán-Navarro (2012) permite trasladar esa base a un sistema de zonas por frecuencia cardíaca que conserva el significado metabólico de cada dominio, facilita la progresión segura de la carga y mejora la transferencia al rendimiento. La combinación de grandes volúmenes en el dominio moderado con bloques específicos en el tramo intermedio y dosis acotadas en el dominio severo, todos definidos respecto a VT1 y VT2, ofrece un marco coherente, individualizado y sustentado científicamente para la planificación del entrenamiento.

Seguimiento de la fatiga acumulada

La medición del lactato en sesiones críticas —por ejemplo, durante un entrenamiento interválico— puede servir para evaluar si la respuesta fisiológica se ajusta al plan previsto. Un atleta sobreentrenado o fatigado puede mostrar niveles de lactato inusualmente elevados a intensidades en las que antes eran más bajos o, por el contrario, dificultades para alcanzar los valores esperados, lo que indicaría una alteración en la capacidad glucolítica.

Optimización de la recuperación

Tras sesiones de alta intensidad, registrar los niveles de lactato en los primeros minutos de la recuperación aporta información sobre la velocidad de aclaramiento. Ajustar protocolos de recuperación activa —como el trote suave— o aplicar masajes de drenaje linfático puede favorecer un retorno más rápido a los valores basales.

Detección de sobreentrenamiento

Definición y señales de alerta

El sobreentrenamiento se caracteriza por un desequilibrio crónico entre el estímulo de entrenamiento y la recuperación, lo que conlleva una disminución del rendimiento y alteraciones fisiológicas y hormonales.

En relación con el lactato, puede manifestarse como un aumento excesivo de su concentración a intensidades moderadas o, por el contrario, como una incapacidad para alcanzar valores esperados en esfuerzos máximos. Otros indicadores

asociados incluyen frecuencias cardíacas más elevadas en reposo y un desequilibrio en la relación cortisol/testosterona, entre otros síntomas frecuentes.

Monitorización continua del rendimiento

La correlación entre la medición de lactato, la frecuencia cardíaca, la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) y la evolución del rendimiento —tiempos o potencias— permite identificar patrones tempranos de deterioro. El perfil individual de lactato, representado en la curva lactato-intensidad, puede alterarse en situaciones de fatiga crónica, mostrando un desplazamiento inesperado de los umbrales.

Decisiones basadas en datos

Cuando se detecta una alteración significativa en la curva de lactato respecto a mediciones previas, es posible ajustar la planificación, reduciendo la carga de entrenamiento, aumentando los días de recuperación o reforzando aspectos clave como la nutrición y el descanso.

Estudios de caso y experiencias prácticas

A continuación, se presentan algunos ejemplos de cómo se utiliza la medición de lactato en distintos contextos de entrenamiento y competición.

- **Implementación en programas de *élite***

Diversos equipos y deportistas de nivel internacional han incorporado la medición regular de lactato en sus rutinas de entrenamiento y competición. A continuación, se presentan algunos ejemplos hipotéticos basados en prácticas habituales en el alto rendimiento:

- **Equipo de ciclismo profesional**

Este tipo de equipos realiza pruebas de lactato en campo, generalmente en tramos de carretera con poca inclinación, para determinar la potencia asociada al umbral anaeróbico y al estado estable de lactato (MLSS, por sus siglas en inglés). Durante las concentraciones en altitud, se llevan a cabo mediciones semanales con el fin de ajustar la intensidad de los intervalos y evitar una fatiga excesiva en un medio hipóxico. Los datos obtenidos se integran con registros de potencia —expresada en vatios— y frecuencia cardíaca, generando perfiles detallados para cada corredor.

- **Selección nacional de atletismo de medio fondo**

En este caso, los entrenadores establecen ritmos de entrenamiento para cada atleta en función de la velocidad asociada a concentraciones de 3 mmol/L y 4 mmol/L de lactato. Utilizan analizadores portátiles tras series de 1000 o 1200 metros para

comprobar si el lactato se encuentra en el rango objetivo, lo que permite ajustar la intensidad sin necesidad de recurrir a pulsómetros o a cálculos precisos de ritmo. A lo largo de la temporada, los resultados se comparan para valorar la mejora de la resistencia láctica y decidir el momento adecuado para introducir entrenamientos de mayor intensidad.

- **Equipo de natación en distancias medias**

En natación, la toma de muestras de sangre durante la sesión presenta una mayor complejidad, por lo que se programan series en las que el nadador sale brevemente de la piscina para realizar la medición. La concentración de lactato se correlaciona con la frecuencia de brazada y con los parciales obtenidos en cada entrenamiento clave. Este procedimiento permite identificar si el nadador se encuentra trabajando en la zona aeróbica de alta intensidad o si ha entrado en esfuerzos predominantemente anaeróbicos.

Resultados obtenidos

- **Optimización de la periodización**

En un estudio de caso con un triatleta de media distancia, se observó que tras ocho semanas de entrenamiento con control de lactato su umbral anaeróbico pasó de 3,2 mmol/L a 3,8 mmol/L a la misma velocidad de carrera. Este cambio reflejó un aumento de la eficiencia aeróbica y la posibilidad de sostener ritmos más rápidos en competición. Al relacionar los datos de lactato con la potencia en ciclismo y con el ritmo en carrera a pie, fue posible diseñar una estrategia de *pacing* más precisa para el día de la prueba.

- **Reducción de lesiones y fatiga**

Algunos equipos de fútbol han informado de una disminución en la incidencia de lesiones musculares tras introducir controles regulares de lactato. Durante periodos de alta carga competitiva, cuando se detectan valores inusualmente elevados en entrenamientos de intensidad moderada, las cargas se ajustan para evitar que los jugadores lleguen a un estado de fatiga excesiva.

- **Mejora en la recuperación y el rendimiento global**

La medición del lactato en el periodo posterior a la sesión permitió a un equipo de remo comprobar que la recuperación activa a baja intensidad —15 minutos de remo muy suave o ejercicio aeróbico ligero— favorecía una reducción más rápida de los niveles de lactato en comparación con el descanso pasivo. Esto se tradujo en un inicio de la siguiente sesión con menor fatiga residual y un mayor rendimiento en el agua.

Conclusiones

La medición del lactato ha dejado de ser una práctica exclusiva de laboratorio para convertirse en una herramienta ampliamente utilizada en la fisiología del ejercicio. Ya sea mediante métodos tradicionales —como la extracción de sangre capilar en pruebas escalonadas— o a través de dispositivos portátiles y *wearables*, su registro ofrece información valiosa sobre la intensidad del esfuerzo, la tolerancia, la recuperación y el estado de fatiga.

Los métodos tradicionales continúan siendo la referencia por su fiabilidad y validación histórica, resultando especialmente útiles para elaborar curvas de lactato, identificar umbrales metabólicos y definir zonas de entrenamiento. Por su parte, las tecnologías avanzadas han abierto la posibilidad de realizar mediciones más frecuentes y menos invasivas, incluso en tiempo real, aunque todavía enfrentan desafíos en términos de precisión y exactitud.

La aplicación práctica de estos datos abarca distintos ámbitos: la personalización de cargas de entrenamiento y recuperación, la detección temprana de fatiga o sobreentrenamiento, el ajuste de planes de periodización y la optimización de la progresión desde el trabajo aeróbico hasta los esfuerzos de máxima intensidad. Los estudios de caso en diferentes disciplinas deportivas muestran cómo la monitorización sistemática del lactato puede contribuir a mejorar el rendimiento competitivo, prevenir lesiones y favorecer una recuperación más eficiente.

De cara al futuro, se espera que la precisión de las tecnologías no invasivas mejore y que la integración de la medición de lactato con otras métricas —como la frecuencia cardíaca, la variabilidad de la frecuencia cardíaca, la glucemia o la potencia— permita un análisis más completo del estado fisiológico del deportista. En cualquier caso, el éxito de su aplicación dependerá siempre de la correcta interpretación de los datos, del criterio profesional y de su adaptación a las características y objetivos de cada disciplina.

Bibliografía

Cadefau, J. A. (2024). *Material docente de Fisiología del Ejercicio I* [presentación PowerPoint]. Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), Universidad de Barcelona (UB).

García Pallarés, J., & Morán-Navarro, R. (2012). Propuesta metodológica para el entrenamiento de la resistencia cardiorrespiratoria. *Journal of Sport and Health Research*, 4(2), 119–136

Skinner, J. S., & McLellan, T. H. (1980). *The transition from aerobic to anaerobic metabolism. Research Quarterly for Exercise and Sport*, 51(1), 234–248. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7394286/>

Referencias bibliográficas de consulta

Brooks, G. A. (1985). Lactate: Glycolytic end product and oxidative substrate during sustained exercise in mammals—the "lactate shuttle". *Circulation*, 72(6), 9–16. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.72.6.9>

Brooks, G. A. (2002). Lactate shuttles in nature. *Biochemical Society Transactions*, 30(2), 258–264. <https://doi.org/10.1042/bst0300258>

Choi, S. J., Lee, H., Ghaffari, R., Park, J., Kim, J., & Lu, N. (2017). Real-time measurement of human salivary lactate by a smartphone-based portable biosensor for point-of-care testing. *Microchemical Journal*, 133, 74–79.

Faude, O., Kindermann, W., & Meyer, T. (2009). Lactate threshold concepts: How valid are they? *Sports Medicine*, 39(6), 469–490. <https://doi.org/10.2165/00007256-200939060-00003>

Fox, E. L., Bowers, R. W., & Foss, M. L. (1991). *The physiological basis for exercise and sport*. WCB/McGraw-Hill.

Gladden, L. B. (2004). Lactate metabolism: A new paradigm for the third millennium. *The Journal of Physiology*, 558(1), 5–30. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2003.058701>

Scott, C. B. (2008). Contribution of blood lactate to the energy expenditure of weight training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(1), 128–132.

Sperandio, P. A., Arantes, R. L., & Silva, R. P. (2016). Portable lactate analyzer vs. reference method: A comparative study. *Biology of Sport*, 33(2), 183–190.

Robergs, R. A., Ghiasvand, F., & Parker, D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 287(3), R502–R516. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00114.2004>

Webber, T. A., Michopoulos, F., & Li, X. (2020). Wearable sweat sensors for continuous lactate monitoring in sports: Current status and future prospects. *Biosensors and Bioelectronics*, 151, 111981.

Wilmore, J. H., Costill, D. L., & Kenney, W. L. (2014). *Physiology of sport and exercise*. Human Kinetics.

