

METABOLISMO ENERGÉTICO EN EL EJERCICIO FÍSICO



Cada segundo que un músculo se contrae, consume ATP. Ese ATP no puede improvisarse: debe producirse a la misma velocidad a la que se consume, y para lograrlo el organismo dispone de un conjunto de rutas metabólicas interconectadas que degradan carbohidratos y grasas, con oxígeno o sin él, según lo que la situación exija. Esta unidad recorre esas rutas una por una y muestra cómo se integran para sostener desde un sprint explosivo hasta un maratón completo (McArdle et al., 2022).

Glucólisis, Glucogenólisis y Glucogénesis

La glucosa es, junto con los ácidos grasos, el sustrato energético más importante del ejercicio. A diferencia de las grasas, puede degradarse en presencia o en ausencia de oxígeno, lo que la convierte en el combustible más versátil del organismo. Comprender

cómo se degrada la glucosa (glucólisis), cómo se libera desde las reservas de glucógeno (glucogenólisis) y cómo se almacena de nuevo tras el ejercicio (glucogénesis) es el punto de partida para entender el metabolismo energético del deporte (Lehninger et al., 2021).

Dato clave

Un deportista entrenado en resistencia puede almacenar hasta 500-600 gramos de glucógeno entre el músculo y el hígado, equivalentes a unas 2,000-2,400 kcal. A un ritmo de carrera competitivo, estas reservas pueden agotarse en apenas 90-120 minutos, lo que explica el fenómeno conocido popularmente como “la pared” (McArdle et al., 2022).

Glucólisis: la vía central de degradación de la glucosa

La glucólisis es la secuencia de diez reacciones enzimáticas que degrada una molécula de glucosa (6 carbonos) en dos moléculas de piruvato (3 carbonos); ocurre en el citosol y no requiere oxígeno. Se divide en dos fases (Murray et al., 2021):

- **Fase de inversión de energía (reacciones 1-5):** Consume 2 ATP para fosforilar la glucosa y prepararla para su ruptura. La hexoquinasa (o glucoquinasa en el hígado) fosforila la glucosa entrante; la fosfofructoquinasa-1 (PFK-1) cataliza el paso comprometido e irreversible de la vía.
- **Fase de generación de energía (reacciones 6-10):** Cada una de las dos moléculas de gliceraldehído-3-fosfato se convierte en piruvato, generando en conjunto 4 ATP (por fosforilación a nivel de sustrato) y 2 NADH.

El balance neto de la glucólisis es de 2 ATP y 2 NADH por molécula de glucosa: **Glucosa + 2 ADP + 2 Pi + 2 NAD⁺ → 2 Piruvato + 2 ATP + 2 NADH + 2 H⁺ + 2 H₂O**. El destino del piruvato depende de la disponibilidad de oxígeno: en condiciones aeróbicas ingresa a la mitocondria; en condiciones anaeróbicas se reduce a lactato para regenerar NAD⁺ y mantener la vía activa (Powers & Howley, 2017).

La enzima reguladora clave de toda la vía es la **PFK-1**, activada alostéricamente por AMP y ADP e inhibida por ATP y citrato, tal como se estudió en la Unidad 1. Esta regulación asegura que la glucólisis se acelere exactamente cuando el músculo necesita más ATP.

Glucogenólisis: liberación de glucosa desde el glucógeno

Cuando la demanda de glucosa aumenta, el organismo recurre primero a sus reservas de glucógeno antes que a la glucosa circulante. La glucogenólisis es el proceso de degradación del glucógeno, catalizado principalmente por la **glucógeno fosforilasa**, que rompe los enlaces α -1,4 liberando unidades de glucosa-1-fosfato desde los extremos no reductores de la molécula ramificada. Una enzima desramificante actúa sobre los enlaces α -1,6 en los puntos de ramificación (Lehninger et al., 2021).

La glucosa-1-fosfato se convierte en glucosa-6-fosfato mediante la fosfoglucomutasa, y desde ahí puede entrar directamente a la glucólisis sin gasto adicional de ATP —una ventaja energética importante frente a la glucosa que ingresa desde la sangre—. En el hígado, a diferencia del músculo, existe la enzima glucosa-6-fosfatasa, que permite liberar glucosa libre hacia la sangre para mantener la glucemia durante el ejercicio prolongado (Murray et al., 2021).

La glucógeno fosforilasa se activa mediante fosforilación covalente en una cascada desencadenada por la adrenalina y el glucagón (vía AMPc $\rightarrow$ PKA $\rightarrow$ fosforilasa quinasa), y también de forma directa por el Ca^{2+} liberado durante la contracción muscular y por el AMP cuando el nivel energético cae —el mismo tipo de regulación integrada estudiado en la Unidad 1 para la PFK-1.

Glucogénesis: síntesis y almacenamiento de glucógeno

La glucogénesis es el proceso inverso: la síntesis de glucógeno a partir de glucosa, fundamental durante la recuperación post-ejercicio. La glucosa-6-fosfato se convierte en glucosa-1-fosfato y luego se activa como **UDP-glucosa** mediante la enzima UDP-glucosa pirofosforilasa. La **glucógeno sintasa** transfiere estas unidades de glucosa a las cadenas de glucógeno en crecimiento mediante enlaces α -1,4, mientras que la enzima ramificante crea los puntos de ramificación α -1,6 cada 8-12 residuos (Gropper & Smith, 2021).

La glucógeno sintasa funciona de manera opuesta a la fosforilasa: su forma activa es la desfosforilada. La **insulina**, liberada tras la ingesta de carbohidratos, activa la glucógeno sintasa (mediante la inhibición de la glucógeno sintasa quinasa-3) y favorece la captación de glucosa muscular vía el transportador GLUT-4, acelerando la resíntesis de glucógeno después del entrenamiento.

Aplicación deportiva — Carga de carbohidratos

La estrategia de carga de carbohidratos (consumir 8-12 g/kg/día de carbohidratos en los días previos a una competencia de resistencia) satura la glucógeno sintasa muscular y puede elevar las reservas de glucógeno un 20-50% por encima de lo habitual, retrasando la aparición de la fatiga en eventos de más de 90 minutos (Burke et al., 2015).

Tabla. Comparación de las tres vías del metabolismo de los carbohidratos

Proceso	Enzima clave	Regulador principal	Contexto deportivo
Glucólisis	Fosfofructoquinasa-1 (PFK-1)	↑AMP/ADP activa; ↑ATP/citrato inhibe	Producción rápida de ATP en ejercicio intenso
Glucogenólisis	Glucógeno fosforilasa	Adrenalina, Ca^{2+} , AMP activan	Liberación de glucosa al inicio del ejercicio
Glucogénesis	Glucógeno sintasa	Insulina activa (vía desfosforilación)	Resíntesis de glucógeno en la recuperación

Nota. Comparación de las tres vías del metabolismo de los carbohidratos. Adaptado de Lehninger et al. (2021) y McArdle et al. (2022).

Ejemplo Integrador: la glucosa en una carrera de 400 metros

Una carrera de 400 metros lisos dura entre 45 y 60 segundos a intensidad casi máxima, lo que la convierte en un excelente ejemplo de integración entre las tres vías estudiadas (McArdle et al., 2022):

- **Primeros segundos:** el sistema de fosfógenos domina, pero la fosfocreatina se agota rápidamente y la glucogenólisis muscular se activa de inmediato, estimulada por la adrenalina liberada antes de la salida y por el Ca^{2+} de la contracción.
- **Del segundo 10 al 40:** la glucólisis anaeróbica, alimentada por la glucosa-1-fosfato liberada del glucógeno, se convierte en la vía dominante, produciendo ATP a gran velocidad, pero generando piruvato más rápido de lo que la mitocondria puede procesar.
- **Últimos metros:** la acumulación de H^+ inhibe la PFK-1 y la fatiga se hace evidente; gran parte del piruvato se ha convertido en lactato.
- **Horas después:** con la ingesta de carbohidratos y la elevación de insulina, la glucógeno sintasa se activa y comienza la glucogénesis para restaurar las reservas musculares.