

## Metabolismo de los Macronutrientes en el Contexto de la Nutrición Deportiva: *Una perspectiva integrada*

### Introducción

El metabolismo de los macronutrientes –carbohidratos, lípidos y proteínas– constituye un pilar fundamental para comprender la fisiología del ejercicio y la nutrición deportiva.

En el ámbito del rendimiento atlético, la eficiente utilización y el almacenamiento estratégico de estos sustratos energéticos son determinantes clave para optimizar la capacidad física, la recuperación y la adaptación al entrenamiento.

En este apartado se abordará el metabolismo de los macronutrientes desde una perspectiva aplicada al deporte, profundizando en las vías metabólicas esenciales y su regulación hormonal, con especial énfasis en el metabolismo de los carbohidratos, un sustrato energético primordial para la mayoría de las disciplinas deportivas.

### 1. METABOLISMO DE LOS CARBOHIDRATOS

Los carbohidratos representan la principal fuente de energía durante el ejercicio de moderada a alta intensidad y juegan un rol crucial en el mantenimiento de la glucemia y la reposición de las reservas energéticas musculares y hepáticas.

Su metabolismo en el contexto deportivo involucra procesos dinámicos y finamente regulados.

#### A.1- METABOLISMO DEL GLUCÓGENO HEPÁTICO

##### 1. EL HÍGADO COMO CENTRAL ENERGÉTICA DEL DEPORTISTA

El hígado actúa como un reservorio crucial de glucógeno, la forma de almacenamiento de la glucosa. El metabolismo del glucógeno hepático está intrínsecamente ligado al mantenimiento de la homeostasis glucémica, especialmente durante el ayuno nocturno y el ejercicio prolongado.

##### a- Inicio del aporte energético hepático:

El hígado comienza a liberar glucosa al torrente sanguíneo a través de la glucogenólisis **casi inmediatamente después de que se inicia la actividad física.**

Esto se debe a que los niveles de glucosa en sangre tienden a disminuir a medida que los músculos comienzan a utilizar sus propias reservas de glucógeno.

La respuesta hormonal (disminución de la insulina y aumento del glucagón y las catecolaminas) pone en marcha este proceso hepático de forma rápida.

#### **b. Duración del suministro energético hepático:**

La cantidad de energía que el hígado puede proporcionar a través de la glucogenólisis depende de las **reservas iniciales de glucógeno hepático**, que a su vez están influenciadas por la dieta previa y el estado de entrenamiento del individuo.

En un individuo adulto promedio, el hígado puede almacenar aproximadamente **70-100 gramos de glucógeno**. Esta cantidad puede proporcionar energía para mantener la glucemia durante un **período que varía entre 1 a 3 horas de ejercicio de intensidad moderada**, asumiendo que no se ingieren carbohidratos durante la actividad.

A medida que las reservas de glucógeno hepático se agotan, la glucemia puede comenzar a disminuir, lo que puede llevar a la fatiga central y la disminución del rendimiento.

## **2- ADAPTACIONES HEPÁTICAS DEL METABOLISMO GLUCÍDICO AL EJERCICIO**

La capacidad del hígado para regular la disponibilidad de glucosa sanguínea a través de la glucogenólisis y la gluconeogénesis, así como para restaurar las reservas energéticas mediante la glucogénesis, experimenta adaptaciones significativas en respuesta al entrenamiento crónico y a las estrategias nutricionales implementadas por el deportista.

A continuación la descripción de cada vía metabólica

#### **a- Gluconeogénesis:**

Cuando las reservas de glucógeno hepático comienzan a agotarse durante el ejercicio prolongado (generalmente después de 90-120 minutos, dependiendo de la intensidad y las reservas iniciales), el hígado puede recurrir a la **gluconeogénesis** para mantener la glucemia.

La gluconeogénesis es el proceso de síntesis de glucosa a partir de precursores no carbohidratados como el lactato (producido por los músculos), el glicerol (liberado de la degradación de las grasas) y los aminoácidos (provenientes de la degradación de proteínas).

La gluconeogénesis es un proceso más lento que la glucogenólisis y su contribución al suministro de glucosa durante el ejercicio aumenta a medida que la actividad se prolonga.

#### b- **Glucogenólisis Hepática:**

Durante el ejercicio, a medida que las reservas de glucógeno muscular se depletan y la glucemia tiende a disminuir, el hígado inicia la glucogenólisis, la degradación del glucógeno hepático en glucosa.

Esta glucosa es liberada al torrente sanguíneo para ser utilizada como fuente de energía por los músculos activos y otros tejidos.

**La intensidad y duración del ejercicio**, así como el estado de las reservas de glucógeno hepático pre-ejercicio, modulan la tasa de glucogenólisis hepática.

#### c- **Glucogénesis Hepática:**

Tras el ejercicio, especialmente con una adecuada ingesta de carbohidratos, el hígado repone sus reservas de glucógeno a través de la glucogénesis, la síntesis de glucógeno a partir de glucosa.

Este proceso es fundamental para la recuperación energética y la preparación para futuras sesiones de entrenamiento.

La tasa de glucogénesis hepática se ve influenciada por la cantidad y el tipo de carbohidratos consumidos, así como por la acción de hormonas como la insulina [2].

### **3- CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DE GLUCÓGENO: HÍGADO VS. MÚSCULO:**

- El **músculo esquelético** tiene una capacidad de almacenamiento de glucógeno significativamente mayor que el hígado. Un individuo promedio puede almacenar aproximadamente **400-500 gramos de glucógeno muscular**, aunque esta cantidad puede variar según la masa muscular y el estado de entrenamiento.

- Atletas de resistencia bien entrenados pueden almacenar cantidades aún mayores.
- El **hígado** almacena una cantidad mucho menor, alrededor de **70-100 gramos de glucógeno**.
- Aunque la cantidad total de glucógeno almacenado en el músculo es mayor, el **glucógeno hepático juega un papel crucial en el mantenimiento de la glucemia sistémica**, mientras que el glucógeno muscular se utiliza principalmente como fuente de energía local dentro del propio músculo. El músculo carece de la enzima glucosa-6-fosfatasa, necesaria para liberar glucosa libre al torrente sanguíneo.

En resumen, el hígado comienza a proveer energía casi inmediatamente durante el ejercicio, sus reservas pueden durar entre 1 y 3 horas dependiendo de la intensidad y las reservas iniciales, y la gluconeogénesis se activa como un mecanismo secundario para mantener la glucemia en ejercicios más prolongados. La capacidad de almacenamiento de glucógeno es mucho mayor en el músculo que en el hígado, pero ambos juegan roles distintos y esenciales en el metabolismo energético durante la actividad física.

## A.2 METABOLISMO ENDÓCRINO Y LA REGULACIÓN DE LA GLUCEMIA

El metabolismo de los carbohidratos durante el ejercicio está bajo una estricta regulación hormonal para asegurar un suministro continuo de glucosa a los tejidos activos y mantener la glucemia dentro de rangos fisiológicos.

- **Insulina:** Esta hormona anabólica, secretada por las células beta del páncreas en respuesta al aumento de la glucemia, facilita la captación de glucosa por el músculo y el hígado para su almacenamiento como glucógeno. Durante el ejercicio, los niveles de insulina tienden a disminuir, lo que favorece la movilización de glucosa desde el hígado y la utilización de glucógeno muscular. Sin embargo, la sensibilidad a la insulina puede aumentar con el entrenamiento regular.
- **Glucagón:** Secretado por las células alfa del páncreas en respuesta a la disminución de la glucemia, el glucagón estimula la glucogenólisis hepática y la gluconeogénesis (la síntesis de glucosa a partir de precursores no carbohidratados) para aumentar la glucosa en sangre. Su acción es contraria a la de la insulina y su secreción se incrementa durante el ejercicio prolongado.

- **Catecolaminas (Adrenalina y Noradrenalina):** Estas hormonas, liberadas por la glándula suprarrenal en respuesta al estrés del ejercicio, también estimulan la glucogenólisis hepática y muscular, contribuyendo al aumento de la disponibilidad de glucosa durante la actividad física intensa [5].
- **Cortisol:** Esta hormona glucocorticoide, liberada en respuesta al estrés prolongado del ejercicio, puede promover la gluconeogénesis hepática y, en situaciones de entrenamiento crónico y sobreentrenamiento, puede influir en la sensibilidad a la insulina y el metabolismo del glucógeno.

### A 3- METABOLISMO DEL GLUCÓGENO MUSCULAR

El glucógeno muscular representa la principal fuente de energía para la contracción muscular durante el ejercicio, especialmente a intensidades moderadas y altas.

Su metabolismo está directamente ligado a la capacidad de rendimiento en deportes de resistencia y de alta intensidad intermitente.

- **Glucogenólisis Muscular:** Durante el ejercicio, la glucogenólisis muscular, la degradación del glucógeno almacenado en las fibras musculares en glucosa-6-fosfato, se activa para proporcionar sustrato para la glucólisis y la producción de ATP.

La tasa de glucogenólisis muscular depende de la intensidad y duración del ejercicio, el estado de las reservas de glucógeno pre-ejercicio y el tipo de fibra muscular reclutada

- **Reposición del Glucógeno Muscular:** La resíntesis de glucógeno muscular tras el ejercicio es un proceso crucial para la recuperación y la adaptación al entrenamiento. La velocidad de esta resíntesis se ve significativamente influenciada por la ingesta de carbohidratos post-ejercicio, siendo más rápida con una ingesta temprana de carbohidratos de alto índice glucémico.

La insulina juega un papel fundamental en la facilitación del transporte de glucosa hacia las células musculares para su almacenamiento como glucógeno.

El entrenamiento regular aumenta la capacidad de almacenamiento de glucógeno muscular

## CONCLUSIÓN

*El metabolismo de los carbohidratos en el deportista es un proceso dinámico y complejo, orquestado por la interacción entre el hígado, el músculo esquelético y un sistema hormonal finamente regulado.*

*La comprensión de las vías metabólicas del glucógeno hepático y muscular, así como el rol de la insulina, el glucagón y las hormonas del estrés, es fundamental para que el nutricionista deportivo pueda diseñar estrategias nutricionales pre, intra y post-ejercicio que optimicen la disponibilidad de energía, mejoren el rendimiento y faciliten la recuperación y adaptación al entrenamiento.*

*La manipulación estratégica de la ingesta de carbohidratos, considerando el tipo, la cantidad y el momento de consumo, se convierte en una herramienta poderosa para modular estas vías metabólicas en beneficio del atleta.*

## Referencias

1. Costill, D. L., Sherman, W. M., Fink, W. J., Maresh, C., Witten, A., & Miller, J. M. (1991). The role of dietary carbohydrates in muscle glycogen resynthesis after strenuous running. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 55(5), 1046-1050.