



Regulación del Metabolismo de Hidratos de Carbono, Grasas, Proteínas y otros Nutrientes durante el Ejercicio

Profesora Carmen Nevárez MHS, LND
Universidad de Puerto Rico
(SADCE)

Regulación del Metabolismo de Hidratos de Carbono, Grasas, Proteínas y otros Nutrientes durante el Ejercicio.

Profesora Carmen Nevárez MHS, LND
Universidad de Puerto Rico
(SADCE)

La utilización de los nutrientes durante el ejercicio, los efectos de estos sobre el rendimiento físico y los efectos del ejercicio en el metabolismo de los nutrientes son temas que se han investigado desde hace mucho tiempo y continúan siendo objeto de continuos estudios y en algunos casos de controversias.

En este artículo pretendo repasar algunos de los muchos factores relevantes que tienen que ver con la regulación de los procesos energéticos durante la realización del ejercicio. Conocemos seis grupos de nutrientes (hidratos de carbono, lípidos, proteínas, vitaminas, minerales y agua), los cuales son interdependientes unos de los otros, y es importante mantener estas relaciones en balance para el funcionamiento adecuado del organismo. Esta interdependencia se acentúa durante la realización de ejercicio, pasando a ser en algunas circunstancias factores claves del rendimiento físico.

De los seis grupos de nutrientes sólo tres tienen la capacidad de producir ATP, y estos son los hidratos de carbono (CHO), proteínas y lípidos. Los restantes tres deberán estar en cantidades adecuadas para que los procesos de producción de energía fluyan adecuadamente.

Los sistemas de producción de energía se han dividido en: sistema no-aeróbico (ATP-fosfocreatina y glucólisis no oxidativa) y sistema aeróbico (glucólisis oxidativa, ciclo de Krebs y cadena de transporte de electrones).

El sistema no-aeróbico es el utilizado en mayor proporción en aquellas actividades que se caracterizan por contracciones musculares de alta intensidad y corta duración (1 seg-10 minutos aprox.). El sistema ATP-PC es el utilizado con mayor prioridad en actividades que duran 1-10 segundos y depende casi exclusivamente de la reserva de ATP que tenga la célula y la rapidez con que pueda ser regenerado utilizando el fosfato de creatina (PC).

La glucólisis no oxidativa es el sistema utilizado en mayor proporción en actividades que duran entre 10 seg-10 minutos. Bajo este sistema los CHO son la fuente energética utilizada preferentemente.

El sistema aeróbico a su vez se caracteriza por tener la capacidad de sostener contracciones musculares por largos períodos de tiempo a intensidades moderadas y bajas. Los hidratos de carbono, amino ácidos y algunos lípidos son utilizados como combustible.

Los CHO entran al ciclo de Krebs en la forma de piruvato, mientras que los amino ácidos tienen que deshacerse de su grupo amino a través de la transaminación o transdeaminación y entrar al ciclo de Krebs a través de diferentes intermediarios. Los ácidos grasos a su vez tienen que pasar por el proceso de lipólisis (si estuviesen unidos a una molécula de glicerol) y luego una vez en la mitocondria pasar por el proceso de oxidación beta de donde se formará el acil-CoA para luego entrar al ciclo de Krebs.

La duración e intensidad de las contracciones musculares serán los factores que determinen la aportación energética de cada uno de estos tres nutrientes.

Regulación metabólica.

- Hidratos de carbono

La glucosa (monosacárido) es la fuente primaria de energía del sistema musculoesqueléticos. Los hidratos de carbono ingeridos son almacenados en forma de glucógeno en el hígado y músculo y cuando las ingestas sobrepasan los requisitos éstos pasan a formar parte de las reservas de grasa corporal.

Dietas altas en este nutriente han comprobado ser efectivas en: aumentar la resistencia muscular, retardar la aparición de los síntomas de fatiga muscular asociados a pobres reservas de glucógeno y aumentar la velocidad de recuperación luego del entrenamiento.

Como consecuencia del entrenamiento ocurren unas adaptaciones que permiten que la glucosa sea utilizada de forma más eficiente durante la realización del ejercicio. Estas son: aumento en la cantidad de enzimas relacionadas a los procesos de producción energética, aumento en la cantidad de glucógeno almacenado en las fibras musculares entrenadas y mayor retención de agua corporal.

La pobre disponibilidad de glucosa y/o glucógeno se asocia con: fatiga muscular, hipoglicemia y reducción en los niveles de piruvato, el cual es importante para la formación de acetil-CoA (factor clave en la formación de intermediarios necesarios en el metabolismo de ácidos grasos y amino ácidos en el ciclo de Krebs).

La regulación metabólica de los CHO durante el ejercicio la podemos dividir en: **a)** control enzimático, **b)** disponibilidad del sustrato y **c)** control hormonal.

a) Control enzimático.

Fosfofructoquinasa: enzima alostérica, controla la velocidad de la fosforilación de fructosa 6-fosfato a fructosa 1,6-difosfato. Se activa con la presencia de altas concentraciones de: AMP, ADP, Pi, fructosa 1,6-difosfato, fructosa 2,6-difosfato, glucosa 1,6-difosfato y NH_4 . Se inactiva ante niveles elevados de: ATP, H^+ y citrato.

Fosforilasa de glucógeno (FG): enzima encargada de la velocidad con que ocurre la glucogenolisis. Esta enzima se encuentra en forma inactiva y su forma activa se denomina FGa.

***Factores que inactivan la fosforilasa son:**

altas concentraciones de ATP e H^+ (inhiben además la conversión de la forma inactiva a la activa), pobres reservas de glucógeno y separación de FG del retículo sarcoplásmico.

***Factores que activan la enzima:**

niveles elevados de FG, ADP, AMP, Pi y la liberación del catión Ca^{2+} del retículo sarcoplásmico.

El inactivar una o ambas enzimas reduce la velocidad de la glucólisis, y por lo tanto, la rapidez con que se produce el ATP disminuye. Provocando esto una reducción en la velocidad e intensidad de la contracción muscular.

b) Disponibilidad del sustrato.

Glucógeno: las reservas de glucógeno muscular previo al ejercicio parecen ser un factor que puede influenciar la velocidad de la glucogenolisis. Aparentemente el glucógeno puede unirse a la fosforilasa de glucógeno, aumentando la actividad de esta enzima.

Varias investigaciones reportan que la velocidad de la glucogenolisis del músculo que va a realizar las contracciones, está directamente relacionada a las concentraciones de glucógeno previo al ejercicio.

Por lo tanto parece ser que niveles elevados de glucógeno previo al ejercicio, estimulan la utilización de glucógeno en la subsiguiente actividad muscular.

Glucosa: Niveles de glucosa en el plasma, previo y durante una sesión de ejercicio, parecen tener la facultad de influenciar sobre la velocidad de la oxidación y glucogenolisis. Niveles bajos de glucosa en sangre durante el ejercicio aumentan la dependencia en el glucógeno muscular como fuente de glucosa. El mantener unos niveles de glucosa en sangre dentro de los parámetros normales durante la realización de ejercicio (como por ejemplo, a través de la ingesta de bebidas deportivas) parece que tiene el efecto ergogénico de mantener la velocidad de oxidación elevada en momentos cuando las reservas de glucógeno están reducidas en vez de reducir la velocidad de utilización del glucógeno muscular.

Ácidos grasos: niveles elevados de ácidos grasos libres en sangre reducen la velocidad de oxidación de glucosa a través de un aumento en los niveles de citrato (intermediario ciclo de Krebs), quien a su vez inhibe la actividad de la enzima fosfofructoquinasa. Esto provoca un aumento en la utilización de ácidos grasos como fuente de energía en el músculo ejercitado. La reducción en la velocidad de la glucólisis ocasiona un aumento en las concentraciones del intermediario glucosa 6-fosfato. Niveles elevados de glucosa 6-fosfato inhiben la actividad de la enzima fosforilasa de glucógeno, reduciéndose también la velocidad de la glucogenolisis.

c) Control hormonal.

Insulina: niveles elevados de insulina (hiperinsulinemia) reducen la lipólisis del tejido adiposo y la disponibilidad de los ácidos grasos libres en sangre.

Epinefrina: niveles elevados de epinefrina han demostrado que aumentan la actividad de la enzima fosforilasa de glucógeno y la glucogenolisis a través de un incremento en los niveles de AMP cíclico.

- Lípidos

De la gran variedad de lípidos encontrados en el cuerpo humano, los utilizados de forma más eficiente como fuente de energía son los ácidos grasos (ag). La utilización de ag va integrada a la oxidación aeróbica de la glucosa y amino ácidos.

La utilización de este sustrato está en balance con una serie de adaptaciones bioquímicas que permiten que la utilización sea más eficiente. Entre estas se encuentran: aumento en el número de enzimas oxidativas y mitocondrias, y sensibilidad del adipocito a la epinefrina.

El proceso de utilizar los ag como fuente energética es relativamente largo si lo comparamos con la glucólisis no oxidativa, por lo tanto la velocidad con que el ATP es producido es menor.

Conforme aumenta la intensidad del ejercicio, aumenta la utilización de ag intramusculares como fuente de energía en el músculo y en el tejido adiposo hay reservas de ag.

La regulación metabólica de los ag la podemos dividir en: regulación extra celular y la regulación intracelular.

Regulación extra celular.

A. Lipólisis: La velocidad con que los ag son liberados al sistema sanguíneo aumenta con el ejercicio.

Este proceso esta bajo la influencia hormonal de:

- *insulina*: niveles elevados reducen la lipólisis, concentraciones bajas favorecen la lipólisis.

- *catecolaminas, hormona paratiroidea y hormona estimuladora de la tiroide*: son las hormonas en seres humanos que consistentemente parecen ser las más efectivas en estimular este proceso.

- *glucosa*: su presencia por sí sola influye en la disminución de velocidad de la lipólisis.

En estudios con seres humanos se ha observado que una hiperglicemia suprime la lipólisis.

B. Velocidad de transporte de los ácidos grasos.

•*concentración de albúmina*: la mayor parte de los ag de cadena larga deben ser transportados unidos a albúmina. De los cerca de 10 lugares que tienen los ag para unirse, sólo 3 son de alta afinidad. Cuando se satura la albúmina, la concentración de ag libres en sangre aumenta exponencialmente, aumentándose entonces la razón ag libres/albúmina. Se asume que este aumento está en equilibrio con la concentración de albúmina.

•*flujo sanguíneo*: durante la realización de ejercicio submáximo ocurre un aumento en el flujo sanguíneo del tejido adiposo. Esto compensa el aumento en la razón ag libres/albúmina favoreciendo la movilización de los ag.

•*reducción en la velocidad de re-esterificación*: en presencia de niveles bajos de glucosa e insulina la velocidad de re-esterificación de los ag inducida por el ejercicio disminuye y la de la lipólisis aumenta favoreciendo la movilización de los ag libres en sangre.

C. Velocidad de absorción a través de la membrana celular.

El transporte de los ácidos grasos a través de la membrana celular es un proceso que en un principio se pensaba que ocurría por difusión pasiva. En estos momentos existe evidencia que contradice esta información, sugiriendo que es un proceso activo mediado por una sustancia transportadora que podría ser una proteína. Este proceso a su vez se encuentra bajo la influencia de las hormonas epinefrina (niveles elevados estimulan el transporte de ag a través de la membrana) e insulina (hiperinsulinemia inhibe el efecto de la epinefrina).

Regulación Intracelular

concentración de ag libres en sangre: en humanos se ha observado que durante la realización de ejercicio submáximo prolongado, hay un aumento gradual en la oxidación muscular de ag en relación con el incremento en las concentraciones de ag libres en el plasma.

capacidad oxidativa de las células musculares reclutadas: se ha observado que el entrenamiento crónico ocasiona alteraciones bioquímicas que favorecen la utilización de los sustratos energéticos.

El ejercicio prolongado a intensidades livianas-moderadas favorece un mayor reclutamiento de las fibras musculares I A y II A. En estas fibras se ha observado mayor concentración de mitocondrias, vasos sanguíneos y enzimas relacionadas con el proceso oxidativo de los ag.

Concentración intramuscular de malonil-CoA: este sustrato es formado durante la reacción alostérica en la síntesis de ag y parece ser que su actividad es dependiente de los cambios en las concentraciones de CHO. En situaciones donde hay abundancia de CHO, se estimula la síntesis de ag, aumentándose la formación de malonil-CoA, esta inhibe la enzima transferasa de carnitina y por ende se reduce la β -oxidación de ag. En situaciones contrarias, niveles bajos de glucosa, reducen la síntesis de ag y la formación de malonil-CoA, liberándose la transferasa de carnitina y aumentándose la β -oxidación.

Disponibilidad de CHO: se ha mencionado anteriormente, que niveles elevados de glucosa por sí sola reducen la velocidad de la lipólisis. Sin embargo, cuando las concentraciones de este sustrato son adecuadas se observa niveles adecuados de piruvato, el cual es esencial para la formación de fumarato, citrato y malato, intermediarios del ciclo de Krebs.

- Amino ácidos

El músculo esquelético constituye aproximadamente el 40% del peso total del cuerpo, y luego de las reservas de grasa corporal, constituye la segunda reserva energética de mayor tamaño en el cuerpo. Se estima que la aportación energética de la proteína durante la realización de ejercicio es pequeña (3-18%), aún así hay evidencia que indica que las reservas de proteínas podrían ser una fuente importante de energía en las fases finales de eventos de larga duración (como el triálo Ironman).

Aún se desconocen muchos aspectos relacionados al metabolismo de los amino ácidos y sus controles metabólicos durante la realización de ejercicio, pero se asume que al igual que la célula muscular sufre adaptaciones bioquímicas para utilizar de forma más eficiente los CHO y ag como fuente energética, de la misma manera ocurrirá para los procesos oxidativos de los amino ácidos.

Una de las clasificaciones de los amino ácidos ha sido de acuerdo a su degradación metabólica. Los amino ácidos cetogénicos son: leucina, triptófano y lisina, estos entran al ciclo de Krebs a través de acetoacetilCoA y acetilCoA.

Los glucogénicos son: aspartato, tirosina, fenilalanina, isoleucina, metionina, treonina, valina, prolina, arginina, histidina, glutamina y glutamato; los intermediarios que utilizan son: piruvato, oxaloacetato, fumarato, succinilCoA y acetoglutarato; los mixtos son: fenilalanina, tirosina e isoleucina y usan intermediarios cetogénicos y glucogénicos.

Aunque en teoría todos los amino ácidos tienen la capacidad de poder oxidarse, hasta el presente se conoce de que por lo menos seis (alanina, aspartato, glutamato y los amino ácidos ramificados), pueden ser degradados por el músculo esquelético durante el ejercicio.

La cantidad de amino ácidos endógenos disponibles para ser utilizados como fuente de energía depende del balance entre la velocidad de síntesis y degradación de estos.

Síntesis de amino ácidos.

La evidencia sugiere que durante el ejercicio la velocidad de síntesis está disminuida en el hígado y músculo esquelético. Esta reducción está a su vez influenciada por: la intensidad y duración del ejercicio, pobres ingestas de proteína dietaria y pobres reservas energéticas en la célula. La velocidad de la síntesis está aumentada en presencia de niveles elevados de insulina, hormona del crecimiento, leucina y otros amino ácidos.

Degradación de amino ácidos

El músculo esquelético tiene dos tipos de proteína:

- a) Contráctil, que representa un 66% de la masa muscular.
- b) No contráctil, que constituye aproximadamente un 34%.

Dentro del campo de la investigación, se ha aceptado como regla general, que el ejercicio aumenta la velocidad de degradación de la proteína no contráctil del hígado y músculo y reduce la de la proteína contráctil en el músculo.

La degradación de amino ácidos está también aumentada como respuesta a: períodos largos de ayuno, niveles elevados de glucocorticoides y glucagón, reducción en la ingesta de proteína dietaria e infusiones de leucina y triglicéridos de cadena media.

Amino Ácidos Ramificados (AAR)

De los seis amino ácidos que pueden ser oxidados en el músculo, no todos tienen el mismo potencial metabólico, siendo los AAR (valina, leucina, isoleucina) los utilizados preferentemente como fuente energética.

En comparación con otros tejidos humanos, el sistema musculoesquelético tiene la distribución enzimática adecuada para promover la utilización de los AAR y son el lugar primario del metabolismo de éstos en el área periférica, durante el ejercicio, los AAR provienen de: la reserva en forma libre intramuscular (menor cantidad) y de la degradación de proteína (fuente principal). El ejercicio estimula el complejo BCOADH (enzima alostérica del metabolismo de los AAR), aumentándose entonces la oxidación de los AAR. Según el ejercicio progresa la oxidación de los AAR aumenta y esto en conjunto con los involucrados en el proceso de gluconeogénesis pueden formar una cantidad considerable del 3-18% de la aportación energética total durante ejercicio.

• Vitaminas y minerales

Estos dos grupos nutrientes tienen entre sus múltiples funciones formar parte de enzimas que a su vez regulan los procesos energéticos. A modo de resumen podemos mencionar lo siguiente:

vitaminas hidrosolubles: todas forman parte del metabolismo de los tres macro nutrientes.

calcio: está relacionado con la contracción muscular, transmisión del impulso nervioso y procesos de activación enzimática.

fósforo:	forma el Pi ⁺ , ATP, P-Cr, y mantenimiento del balance ácido/base.
magnesio:	está relacionado con la relajación de la contracción muscular, síntesis de proteínas y metabolismo de CHO.
sodio y potasio:	transmisión del impulso nervioso, mantenimiento y balance de la concentración de agua corporal.
hierro:	forma parte de las proteínas hemínicas como hemoglobina y mioglobina. Cumple un rol importante en fenómenos de estrés oxidativo.
cobre:	importante para que haya una utilización adecuada de la hemoglobina y co-factor de enzimas.
zinc:	co-factor de enzimas que están relacionadas con la síntesis y metabolismo de energía.
cromo:	ayuda a que la insulina funcione de forma más eficiente.
selenio:	co-factor de la glutatión peroxidasa.

Conclusión

La utilización de los nutrientes durante los procesos de producción energética está regulada por una serie de sustancias metabólicamente activas, que a su vez son interdependientes. Alteraciones en la biodisponibilidad de las mismas y en las concentraciones de los nutrientes provocan cambios, que en algunos casos pueden ser compensados por mecanismos alternos, pero en otras situaciones estos desbalances pueden desencadenar otra serie de reacciones que podrían ser perjudiciales a la estabilidad de los procesos de producción energética.

La continua investigación facilitará que se esclarezcan estos mecanismos para que el entendimiento humano pueda ponerlos al servicio de la humanidad.

Bibliografía

1. Mark Hargreaves. 1995 **Exercise Metabolism**. Human Kinetics Publishers Inc. Caps 1-5.
2. Powers Scott, Edward T. Howley. 1997. **Exercise Physiology: Theory and Application to Fitness and Performance**. 3era Ed. Brown and Benchmark publishers Cap. 4
3. Williams Melvin. 1995. **Nutrition for Fitness and Sport**. 4ta Ed. Benchmark Publishers Caps. 3-6.

Producción de Energía

