



UNIVERSIDAD DE SEVILLA  
FACULTAD DE FARMACIA

# COMBUSTIBLES METABÓLICOS Y ACTIVIDAD FÍSICA



Juan Luis Tejero Corrales





UNIVERSIDAD DE SEVILLA  
FACULTAD DE FARMACIA  
GRADO EN FARMACIA

TRABAJO FIN DE GRADO

Revisión bibliográfica

COMBUSTIBLES METABÓLICOS Y  
ACTIVIDAD FÍSICA

Trabajo realizado por: Juan Luis Tejero Corrales

Tutor: Diego Ruano Caballero

Departamento de Bioquímica y Biología Molecular

Sevilla, Diciembre de 2020



## RESUMEN

El músculo esquelético emplea diversos combustibles para lograr su contracción. El uso de uno u otro depende de la intensidad del ejercicio, variando desde el empleo de ácidos grasos y glucosa procedentes de la sangre para actividades de baja intensidad hasta el uso de glucosa procedente del glucógeno muscular, o de fosfocreatina para las intensidades más elevadas.

Dos factores permiten al músculo esquelético adaptar su metabolismo. El primero consiste en la práctica de ejercicios, que se clasifican en aeróbicos y anaeróbicos según los combustibles que emplee el músculo en sus contracciones, y que posibilitan una mejora de la resistencia al cansancio y de la capacidad explosiva, respectivamente. El segundo factor lo constituye la dieta, incluyendo la ingesta de suplementos, la cual puede regular los combustibles de los que dispone el músculo para realizar distintas actividades físicas, y así incentivar su adaptación a un tipo de metabolismo sobre otro.

Entre la población general deportista podemos encontrar ciertas prácticas dietéticas, cuya eficacia en la mejora de la capacidad muscular ante el ejercicio no está demostrada, o bien se llevan a cabo de forma no adecuada. En relación con esto, desde el punto de vista científico, la dieta cetogénica solo resulta beneficiosa para ciertas prácticas deportivas, el beneficio por uso de antioxidantes es motivo de discusión y la suplementación proteica a fin de desarrollar la hipertrofia muscular posee una efectividad limitada.

En los atletas de élite, las dietas resultan esenciales para conseguir un alto rendimiento y lograr el éxito. Así, las dietas varían según las distintas prácticas deportivas y el momento de la temporada. En este trabajo nos centramos en las que siguen velocistas, saltadores, lanzadores, decatletas y corredores de ultramaratón.

## PALABRAS CLAVE

Combustibles metabólicos, metabolismo, dietas, atletas de élite.



## ÍNDICE

|   |    |
|---|----|
| I. INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| II. OBJETIVOS .....   | 2  |
| III. METODOLOGÍA.....   | 2  |
| IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                               | 3  |
| 1. MÚSCULO ESQUELÉTICO .....                                  | 3  |
| 2. COMBUSTIBLES METABÓLICOS .....                             | 6  |
| 2.1. Glúcidos, hidratos de carbono, o carbohidratos .....     | 6  |
| 2.2. Lípidos, o grasas.....                                   | 7  |
| 2.3. Cuerpos cetónicos .....                                  | 8  |
| 2.4. Proteínas .....  | 9  |
| 2.5. Fosfocreatina .....                                      | 9  |
| 2.6. ATP .....  | 10 |
| 3. METABOLISMO DURANTE EL EJERCICIO .....                     | 11 |
| 3.1. Combustibles, intensidad y duración del ejercicio.....   | 11 |
| 3.2. Ejercicios aeróbicos y anaeróbicos .....                 | 14 |
| 3.3. HIIT y ultra-resistencia .....                           | 15 |
| 4. DIETAS Y SUPLEMENTOS EN EL METABOLISMO DEL EJERCICIO ..... | 17 |
| 4.1. Dieta cetogénica .....                                   | 18 |
| 4.2. Suplementos dietéticos .....                             | 19 |
| 4.2.1. Antioxidantes .....                                    | 19 |
| 4.2.2. Suplementación proteica.....                           | 20 |
| 4.2.3. Creatina .....   | 21 |
| 4.3. Dietas en atletas de élite .....                         | 21 |
| 4.3.1. Velocistas .....                                       | 21 |
| 4.3.2. Atletas explosivos .....                               | 22 |
| 4.3.2.1. Saltadores .....                                     | 22 |
| 4.3.2.2. Lanzadores .....                                     | 22 |
| 4.3.2.3. Decatletas .....                                     | 23 |
| 4.3.3. Ultramaratón .....                                     | 23 |
| V. CONCLUSIONES .....   | 27 |
| VI. BIBLIOGRAFÍA.....   | 29 |





## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado un incremento en la práctica de actividad física y ejercicio entre la población (García-Ferrando and Llopis-Goig, 2010; Ministerio de Educación Cultura y Deporte, 2015). Un auge al que ha contribuido, entre otros, el aumento de la recomendación de la práctica de ejercicio por parte de médicos, y el creciente número de recursos, desde tutoriales hasta aplicaciones, de acceso telemático, con el objetivo de animar a realizar diversas actividades físicas.

Mientras que la actividad física hace referencia a cualquier movimiento que involucre a los músculos esqueléticos y exija un gasto energético, el ejercicio físico comprende aquellas actividades físicas que están planificadas y se practican de forma repetida, y el deporte lleva estas actividades o ejercicios a un nivel competitivo. Sin embargo, entre la población general, estos términos se emplean como sinónimos.

Desde el punto de vista de la actividad física, cualquier actividad realizada, desde dar un paseo hasta correr una ultramaratón, conlleva un gasto energético, procedente de los distintos combustibles de los que dispone el organismo. Sin embargo, los estudios entre la población general relacionados con el ejercicio se centran más en la prevención y/o mejora de patologías que en el empleo de combustibles; algo que se ha relegado más al campo del deporte. Sin duda, para los deportistas, especialmente de élite, conocer los combustibles que más emplea su cuerpo para una práctica deportiva concreta puede ser especialmente útil. Existe tal número de deportes y con tales diferencias entre sí que los músculos se desarrollan de forma distinta, y por tanto no sería de extrañar que los combustibles empleados por el músculo variasen notablemente entre deportistas de distintas especialidades.

Además, resulta llamativa la variedad de respuestas entre individuos que practican una misma actividad. Así, entre deportistas que siguen un mismo entrenamiento, encontramos desde quienes no responden al mismo y no presentan cambios en su desarrollo muscular, hasta aquellos que consiguen una respuesta elevada y adquieren en poco tiempo una importante ganancia de masa muscular, e incluso algunos para los que ese mismo entrenamiento se traduce en consecuencias negativas (Egan and Zierath, 2013). Esta variedad de respuestas responde a diversos factores, como la genética de cada persona, el tipo de vida que lleven, u otros, como puede ser la dieta (Egan and Zierath, 2013).

Si bien la práctica de ejercicio va asociada con la idea de beneficios para la salud, y a pesar de que se han desarrollado tantos medios para animar a la práctica del deporte, nos encontramos con que la población en general o bien no suele tener en cuenta la dieta a la hora de practicar ejercicio, o bien la tiene en cuenta con el objetivo, sobre todo, de desarrollar musculatura, y emplean técnicas y suplementos sin preocuparse de una garantía científica sobre su uso. Por el contrario, entre los deportistas de élite, nos encontramos con una exhaustiva planificación de su alimentación según las distintas prácticas deportivas, pudiendo llegar a involucrar a nutricionistas.

Con este trabajo se ha tratado de recopilar información sobre la dieta de deportistas de élite y algunas de las prácticas dietéticas comunes entre la población general que buscan mejorar el rendimiento del ejercicio y así obtener mayores beneficios. Y con ello ofrecer a la población aficionada al deporte y la actividad física una información más acorde a las evidencias científicas.

## II. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta revisión bibliográfica es llevar a cabo un estudio respecto a la diversidad de estrategias nutricionales en relación con la actividad deportiva, analizando el acierto o la adecuación de dichas estrategias para mejorar el rendimiento.

Previamente, para una mejor comprensión del tema, se exponen algunas nociones básicas sobre el músculo esquelético, su metabolismo y los combustibles que emplea según el tipo de ejercicio practicado.

## III. METODOLOGÍA

En este trabajo de revisión bibliográfica se han empleado como gestores de búsquedas PubMed, Google Scholar y SportDiscus. Sin embargo, debido a las condiciones de búsqueda, como se expondrá más adelante, el principal gestor usado fue PubMed del que se obtuvieron la mayoría de los artículos empleados, mientras que Google Scholar aportó uno de los artículos presentes en esta revisión, y no hubo resultados efectivos en la búsqueda en SportDiscus. En estos dos últimos gestores, la dificultad estuvo en la imposibilidad de garantizar los criterios de búsqueda antes de la lectura detallada de los artículos, lo cual limitaba su uso.

Entre los términos utilizados en la búsqueda se incluyeron: *exercise, metabolism, skeletal muscle, anaerobic, metabolic pathways, muscular, muscle fibers, muscle energy,*

*fuels, sport, glucose metabolism, lipid metabolism, protein metabolism, amino acid metabolism, ketone bodies, ketogenic diet, ultramarathon, fosfocreatina*; así como posibles combinaciones de estos. Se aplicaron como factores de búsqueda que fueran artículos de revisión publicados en los últimos cinco años, con acceso a texto completo y se mostraran ordenados por los mejores resultados.

Debido a la gran cantidad de resultados, tan solo se tomaron en cuenta los primeros 20 de cada búsqueda, de los cuales se seleccionaron los más adecuados para este estudio tras leer sus títulos y resúmenes. Existen artículos que no cumplían con el criterio restrictivo de tiempo de publicación, pero debido a su importancia en el contenido, se optó por mantenerlos.

Además, es necesario señalar que la búsqueda de artículos comprendió desde el 25 de diciembre de 2019 hasta el 28 de septiembre de 2020, salvo el periodo de marzo a julio de 2020 en el que no se realizaron búsquedas.

Para completar información importante no presente en los artículos, se consultaron dos libros de referencia en fisiología y bioquímica, respectivamente, incluidos también en la bibliografía.

Como gestor bibliográfico se ha empleado el programa Mendeley.

Para los esquemas de elaboración propia presentes en este trabajo, se recurrió al programa Microsoft PowerPoint e imágenes procedentes de Creative Commons.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

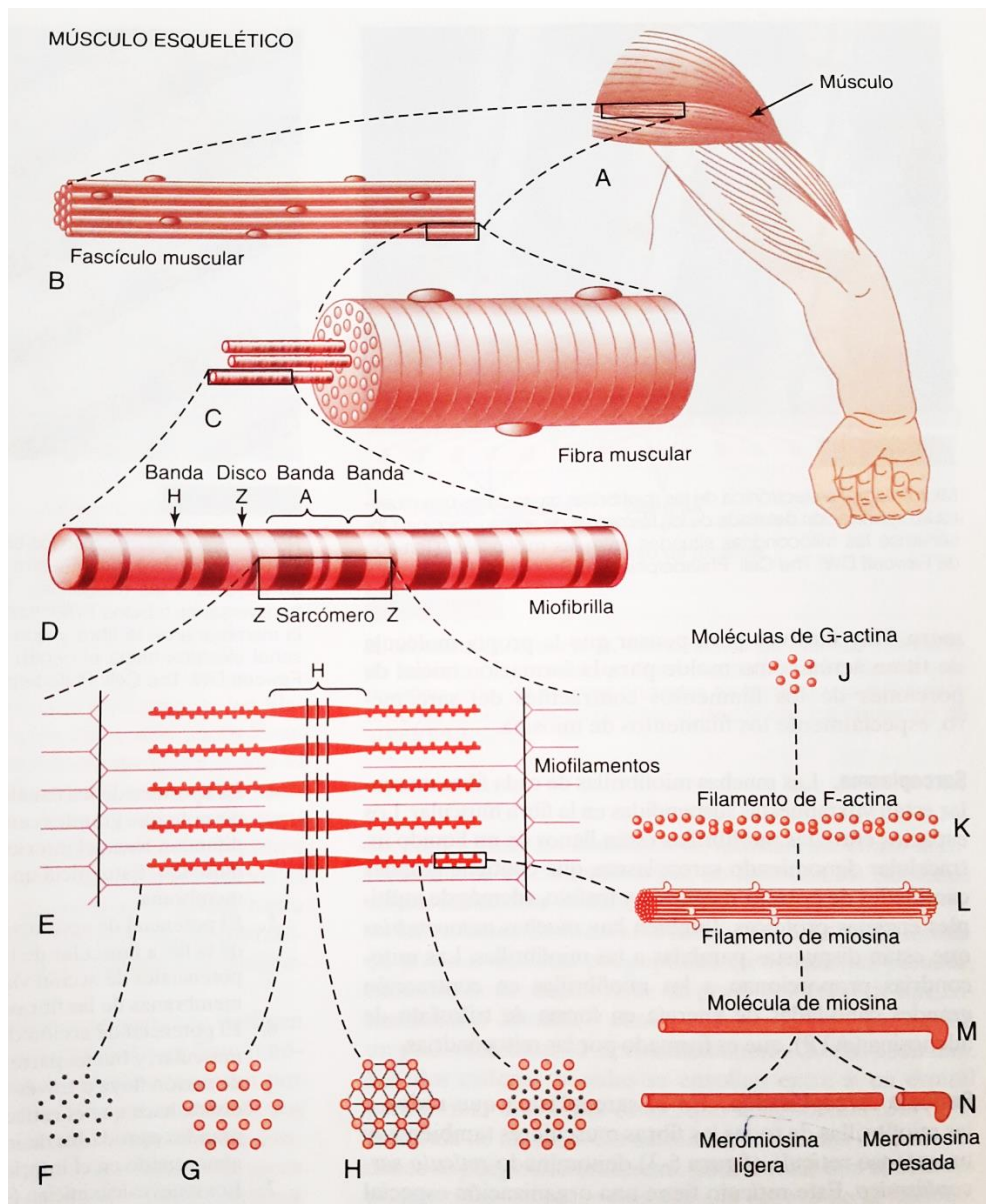
##### 1. MÚSCULO ESQUELÉTICO

El músculo esquelético es el tejido responsable de producir fuerza contráctil a partir de reacciones químicas, tal que nos podamos mover. Se trata de un tejido altamente plástico que se adapta a los cambios en la ingesta nutricional y la actividad contráctil; además, es el mayor contribuyente del gasto energético en reposo (McGlory et al., 2017; Stokes et al., 2018).

No todos los músculos son iguales, y el músculo esquelético solo es una clase entre todos ellos. Este tipo de músculo, caracterizado por la capacidad de contraerse a voluntad, es un subtipo dentro de los músculos estriados, denominados así por la

apariencia que presentan, derivada de la disposición de las fibras, permitiendo una contracción coordinada de todo el músculo (Kuo and Ehrlich, 2015).

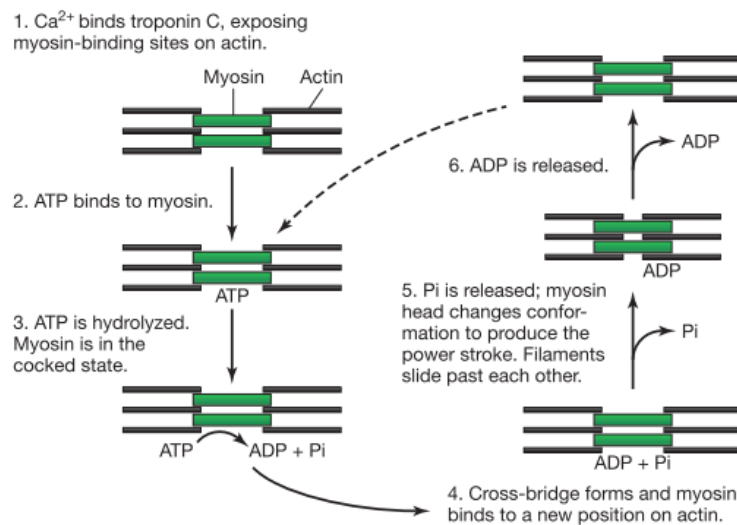
El músculo esquelético está compuesto de fibras musculares, agrupadas en fascículos, y compuestas a su vez de miofibrillas, dentro de las cuales se observan los sarcómeros, donde se encuentran filamentos de actina y miosina, proteínas responsables de la contracción al acortarse y/o alargarse la distancia entre éstas (Guyton, 2010; Kuo and Ehrlich, 2015).



**Figura 1.** Estructuras implicadas en la contracción del músculo esquelético. (Guyton, 2010)

La contracción depende de los niveles de calcio, así como de la fosforilación, alternando entre el estado de contracción y relajación según oscilen sus niveles respecto a los basales (Kuo and Ehrlich, 2015). En este proceso, primero tiene lugar una

despolarización en la membrana de las células musculares, tal que se activan los canales dependientes de voltaje y originan un potencial de acción que estimula a los canales de calcio (Kuo and Ehrlich, 2015). Estos canales, situados tanto en estructuras internas celulares de almacenamiento como en la membrana externa, una vez estimulados, provocan el incremento de la concentración de iones de  $\text{Ca}^{2+}$  intracelular (Kuo and Ehrlich, 2015). Esto conlleva que los iones lleguen a unirse a estructuras de los filamentos de actina en el músculo estriado, provocando una exposición de zonas donde se puede unir la miosina (Kuo and Ehrlich, 2015). La adenosina trifosfato (ATP) se une a la miosina e inmediatamente se transforma en adenosina difosfato (ADP) y fosfato inorgánico (Pi), permitiendo la formación de los puentes cruzados actina-miosina; y la posterior liberación de ADP y Pi provoca un golpe activo que se transduce en contracción, debida al deslizamiento de los filamentos gruesos de miosina entre los finos de actina, acortando el músculo (Kuo and Ehrlich, 2015). La posterior unión de ATP permite liberar a la miosina de su unión a la actina, y así recuperar la posición original, dando lugar a un nuevo ciclo de hidrólisis de ATP (Kuo and Ehrlich, 2015).



**Figura 2.** Esquema de la contracción muscular. (Kuo and Ehrlich, 2015)

Si bien todas las fibras que componen los distintos músculos esqueléticos presentan este sistema de contracción, estas poseen una serie de características, como velocidad de contracción y metabolismo, que permiten su clasificación en tres tipos (Egan and Zierath, 2013) (Tabla 1).

|   | Tipo I          | Tipo IIa                    | Tipo IIx              |
|---|-----------------|-----------------------------|-----------------------|
| Velocidad de contracción                                      | Lenta           | Rápida                      | Rápida                |
| Fuerza producida  | Débil           | Intermedia                  | Fuerte                |
| Cansancio   | Resistente      | Resistente                  | Rápido                |
| Apariencia  | Rojo            | Rojo                        | Blanco                |
| Metabolismo   | Oxidativo       | Oxidativo/glucolítico       | Glucolítico           |
| Tipos de ejercicio en los que predomina (Intensidad/Duración) | Baja/Prolongada | Alta/Moderada               | Máxima/Corta          |
| Ejemplos de ejercicio   | Caminar         | Carreras de media distancia | Levantamiento de peso |

**Tabla 1.** Tabla con los distintos tipos de fibras. Adaptado desde (Egan and Zierath, 2013)

Estos diferentes tipos de fibras permiten al músculo adaptarse a la diversidad de actividades físicas, según las circunstancias, mediante cambios en la proporción de dichas fibras; aunque también existen ciertos músculos que solo presentan un tipo (Qaisar et al., 2016).

## 2. COMBUSTIBLES METABÓLICOS

El músculo necesita energía para poder llevar a cabo la contracción. Para esto, el músculo cuenta con los siguientes combustibles metabólicos:

### 2.1. Glúcidos, hidratos de carbono, o carbohidratos

Los glúcidos constituyen la fuente energética principal para el organismo, destacando la glucosa como el metabolito clave en todo el metabolismo (Nelson, 2013). La glucosa se puede almacenar en forma de glucógeno, un polímero ramificado de glucosas, o bien metabolizarse hasta piruvato con el objetivo de obtener energía (Nelson, 2013). En el músculo encontramos el mayor contenido de glucógeno (Stokes et al., 2018), aunque también se localiza esta forma de reserva energética en el hígado; sin embargo, la degradación del glucógeno hepático tiene el objetivo de liberar glucosa al torrente sanguíneo para mantener el control de la glucemia, mientras el glucógeno muscular se emplea en exclusiva para llevar a cabo la contracción (Stokes et al., 2018).

La glucosa se obtiene, además de las reservas previamente citadas, de la dieta, y en ciertos casos de diversos sustratos como lactatos, gliceroles (procedentes del metabolismo de lípidos) y ciertos aminoácidos presentes en el organismo (Nelson, 2013).

Para obtener energía a partir de la glucosa, esta se ha de degradar (glucolisis) hasta piruvato, el cual presenta dos posibles vías para obtener energía (Nelson, 2013). En caso

de que se pueda metabolizar en las mitocondrias con presencia de oxígeno, a partir del piruvato se obtiene acetil-coenzima A, sustrato clave en el ciclo de los ácidos tricarbónicos, también denominado ciclo del ácido cítrico y ciclo de Krebs, gracias al cual se obtiene posteriormente ATP consumiendo oxígeno en la cadena de transporte electrónico mitocondrial (Nelson, 2013). Mientras que, si no hay suficiente oxígeno o mitocondrias, la obtención de energía a partir del piruvato pasa por una fosforilación a nivel de sustrato hasta lactato, obteniendo ATP (Nelson, 2013).

La diferencia entre un metabolismo y otro, más allá de la transformación de piruvato hasta acetil-coenzima A o lactato, reside en la producción de ATP, siendo esta mucho mayor en caso de la glucólisis aeróbica (degradación de glucosa en presencia de oxígeno) respecto a la glucólisis anaeróbica (degradación de glucosa sin oxígeno) (Nelson, 2013). Sin embargo, la producción de ATP procedente del metabolismo anaeróbico es más rápida que la correspondiente al metabolismo aeróbico (Hargreaves and Spriet, 2020). Además, estas diferencias son extrapolables a todos los combustibles, según empleen un metabolismo aeróbico o anaeróbico (Hargreaves and Spriet, 2020).

El lactato producido en la glucólisis anaeróbica puede transformarse de nuevo en glucosa, en el hígado, cuando el organismo se encuentra en una situación de reposo, para posteriormente liberar esa glucosa al torrente sanguíneo siendo de nuevo captada por el músculo, lo que se conoce como ciclo de Cori (Nelson, 2013). Además, el lactato se relaciona con la aparición de fatiga muscular, pudiendo llegar a disminuir el flujo glucolítico (Theofilidis et al., 2018). Otros autores, sin embargo, consideran que el organismo cuenta con reservas específicas para la producción de lactato con el objetivo de obtener energía (Heydemann, 2018).

Es necesario señalar que los glúcidos son el único combustible que puede presentar metabolismo aeróbico y anaeróbico, acorde a las circunstancias, traduciéndose en variedad de vías metabólicas para obtener energía frente a otros combustibles, y que pueden metabolizarse más rápido para obtener ATP (Hargreaves and Spriet, 2020; Nelson, 2013).

## **2.2.Lípidos, o grasas**

Los lípidos destacan por su papel como almacenamiento energético en el organismo, aunque también forman parte de las membranas lipídicas de todas las células. De entre todos los lípidos, destaca un tipo dentro del grupo de las grasas, los triglicéridos,

sintetizados a partir de tres ácidos grasos y un glicerol. Aunque los triglicéridos abundan especialmente en el tejido adiposo, también se localizan formando gotas en el interior del músculo esquelético (Nelson, 2013).

Ante una necesidad energética, los triglicéridos del tejido adiposo se degradan liberando los ácidos grasos que son transportados en la albúmina de la sangre hasta los músculos; y una vez en el músculo, los ácidos grasos se degradan por  $\beta$ -oxidación obteniendo varias unidades de acetil-coenzima A que pasa a las mitocondrias y se metaboliza por el ciclo de los ácidos tricarbónicos, obteniéndose así ATP (Nelson, 2013). Por otro lado, los triglicéridos existentes en el músculo esquelético presentan este metabolismo en reposo, siendo el principal aporte energético en tal situación (Nelson, 2013). Se debe señalar que el metabolismo de los lípidos es el que más ATP produce (Nelson, 2013), así como que requiere de oxígeno y mitocondrias, siendo un metabolismo aeróbico.

Cuando existe un exceso de ácidos grasos o triglicéridos, estos se transportan al hígado para ser metabolizados, bien con el objetivo de obtener ATP para este órgano o bien para sintetizar lipoproteínas o cuerpos cetónicos (Nelson, 2013).

### **2.3.Cuerpos cetónicos**

Cuando los ácidos grasos llegan al hígado, bien se oxidan hasta formar acetil-coenzima A que entra en el ciclo de los ácidos tricarbónicos, o bien se emplean en la síntesis de cuerpos cetónicos, a saber, acetona, acetoacetato y  $\beta$ -hidroxibutirato, que pasan a la sangre; y solo los dos últimos son usados como combustibles en los tejidos extrahepáticos, incluyendo el músculo esquelético, donde son transformados de nuevo en acetil-coenzima A, que se oxidaría en el ciclo de los ácidos tricarbónicos para producir ATP (Nelson, 2013).

Debido a esta ruta metabólica, los cuerpos cetónicos tan solo presentan un metabolismo aeróbico. Sin embargo, hay que tener precaución con estos metabolitos, dado que si aumenta excesivamente su concentración en sangre puede producirse cetoacidosis en los individuos, una situación que puede poner en riesgo la vida (Cantrell and Mohiuddin, 2020; Nelson, 2013). Se debe señalar, además, que la producción de los cuerpos cetónicos solo tiene lugar en el hígado, y una vez que se hayan agotado las reservas de glucógeno (Evans et al., 2019).



## **2.4. Proteínas**

A diferencia de otros combustibles, las proteínas no se almacenan, sino que constituyen diversos tejidos, incluyendo los que conforman el músculo, y también enzimas, hormonas y neurotransmisores (Bytomski, 2018). El punto clave del metabolismo en este caso son los aminoácidos, ya que tanto las proteínas procedentes de la dieta como las proteínas intracelulares, estas últimas sólo cuando es necesario, se degradan hasta aminoácidos, los cuales son metabolizados en el hígado, separando su estructura en, por un lado, el esqueleto carbonado, y por otro, el grupo amino (Nelson, 2013). El esqueleto carbonado se transforma hasta  $\alpha$ -cetoácidos que bien pueden ser oxidados en el ciclo de los ácidos tricarbóxicos para obtener ATP o bien se emplean para sintetizar glucosa; mientras que el grupo  $\alpha$ -amino se transforma en ion amonio, el cual es empleado en la biosíntesis de nuevos aminoácidos y nucleótidos o es excretado mediante el ciclo de la urea (Nelson, 2013).

Si bien la mayoría de los aminoácidos se metabolizan en el hígado, se observa que los aminoácidos de cadena ramificada juegan un papel importante en el metabolismo muscular (Stokes et al., 2018). Estos aminoácidos (leucina, isoleucina y valina) pueden ser oxidados en los tejidos extrahepáticos, incluyendo el músculo esquelético, para obtener  $\alpha$ -cetoácidos; y con ellos, principalmente, obtener ATP (Nelson, 2013). Aunque el aporte de ATP por esta vía es pequeño, puede incrementarse su contribución ante la escasez de otros combustibles, principalmente ante una baja disponibilidad de carbohidratos (Hargreaves and Spriet, 2020).

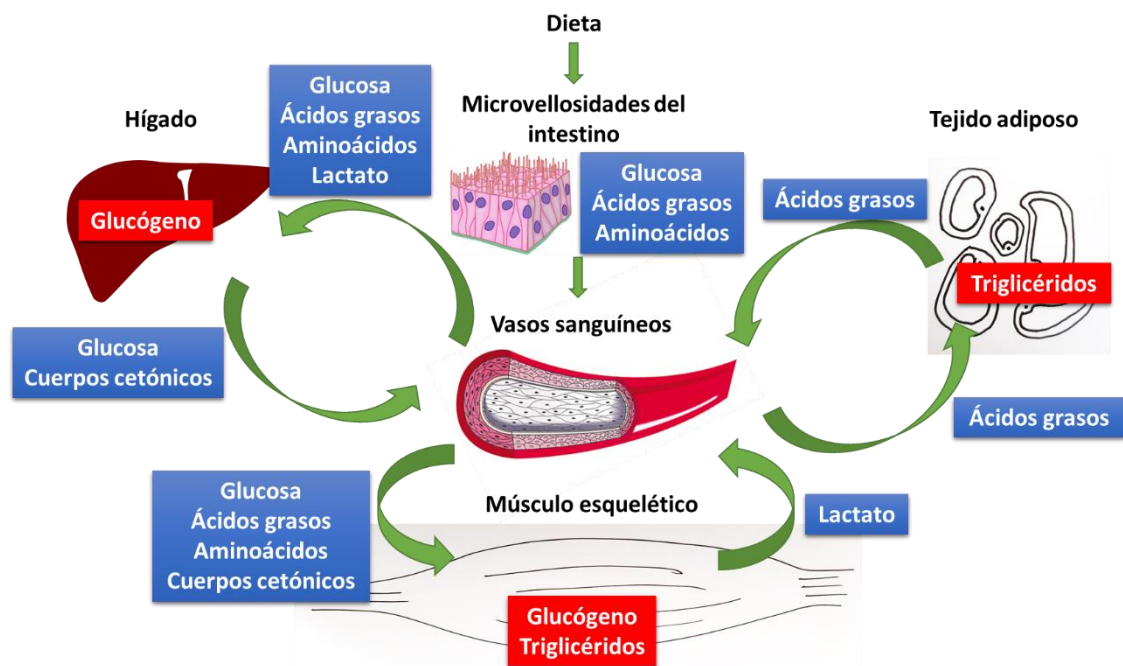
## **2.5. Fosfocreatina**

Este combustible solo se observa en los músculos y permite la generación de ATP en los ejercicios de elevada intensidad (Guimarães-Ferreira, 2014). Consiste en una creatina, sintetizada a partir de los aminoácidos glicina, arginina y metionina, a la cual se une un grupo fosfato procedente del ATP generado en las mitocondrias (Guimarães-Ferreira, 2014; Nelson, 2013). Ante un elevado gasto de ATP, la fosfocreatina presente en el citosol permite una regeneración rápida de ATP, al romperse su enlace fosfato y unirse ese grupo al ADP resultante de la degradación del ATP, y recuperándose la creatina (Guimarães-Ferreira, 2014). Por su parte, esta creatina se emplea en la regeneración de fosfocreatina ante una producción continuada de ATP procedente de un metabolismo aeróbico (Hargreaves and Spriet, 2020). En consecuencia, la fosfocreatina como

combustible presenta un metabolismo anaeróbico, pero para su síntesis precisa de un metabolismo aeróbico en las mitocondrias.

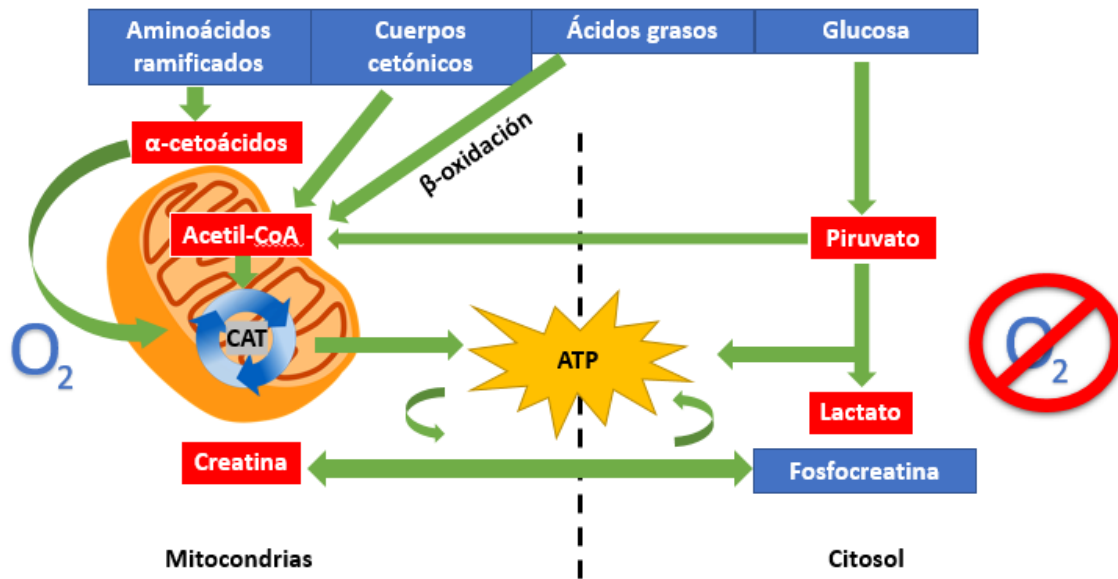
## 2.6.ATP

El punto común de todos los combustibles anteriores, bien por metabolismo aeróbico o anaeróbico, es la producción de ATP, que constituye la moneda de cambio para los procesos energéticos en el organismo, y es por tanto responsable, además de otros procesos, de la contracción del músculo esquelético. Y aunque se observa la presencia de ATP almacenado en los músculos, su cantidad es tan pequeña que requiere de los otros combustibles para mantener la capacidad de contracción (Hargreaves and Spriet, 2020).



**Figura 3.** Esquema-resumen de la distribución de reservas y combustibles metabólicos.

*Términos en azul: combustibles metabólicos; términos en rojo: principales reservas energéticas. Esquema de elaboración propia, realizado mediante Microsoft PowerPoint, con imágenes en color procedentes de Creative Commons e imágenes en blanco y negro de creación propia.*



**Figura 4.** Esquema-resumen del metabolismo de los combustibles en el músculo esquelético. Términos en azul: combustibles metabólicos; términos en rojo: metabolitos esenciales del metabolismo; CAT: ciclo de los ácidos tricarboxílicos. La línea intermitente representa la separación entre el metabolismo aeróbico en mitocondrias y el anaeróbico en el citosol. Esquema de elaboración propia, realizado mediante Microsoft PowerPoint con imágenes en color procedentes de Creative Commons.

### 3. METABOLISMO DURANTE EL EJERCICIO

La variedad de combustibles que puede usar el músculo, como hemos visto anteriormente, es considerable; sin embargo, no siempre emplea todas las rutas, sino que adecua el uso de combustibles a las distintas situaciones.

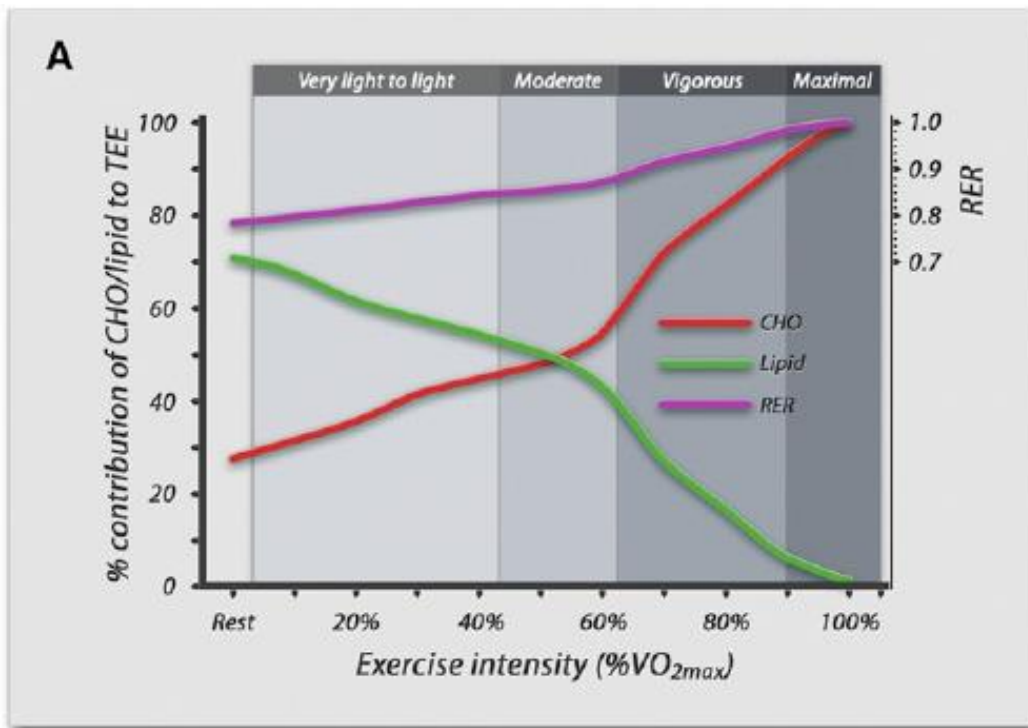
#### 3.1. Combustibles, intensidad y duración del ejercicio

Dos factores importantes que regulan si el músculo emplea un combustible u otro son la intensidad y la duración del ejercicio, existiendo una relación antagónica entre ellas, tal que, a mayor intensidad, menos tiempo puede mantenerse la realización de un ejercicio, y viceversa.

Para medir la intensidad, podemos encontrar dos métodos. Uno consiste en medir la intensidad según la proporción del consumo de oxígeno respecto al valor máximo, expresado como %VO<sub>2máx</sub>, tal que conforme más se acerca al 100%, mayor es la intensidad (Egan and Zierath, 2013; Hawley and Leckey, 2015). El otro método de medida tiene mayor relación con los tipos de combustibles empleados que con la intensidad del ejercicio: la tasa de intercambio respiratorio (RER; siglas en inglés), que

consiste en la relación entre el volumen de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) producido y el volumen de oxígeno (O<sub>2</sub>) consumido (Egan and Zierath, 2013; Hawley and Leckey, 2015).

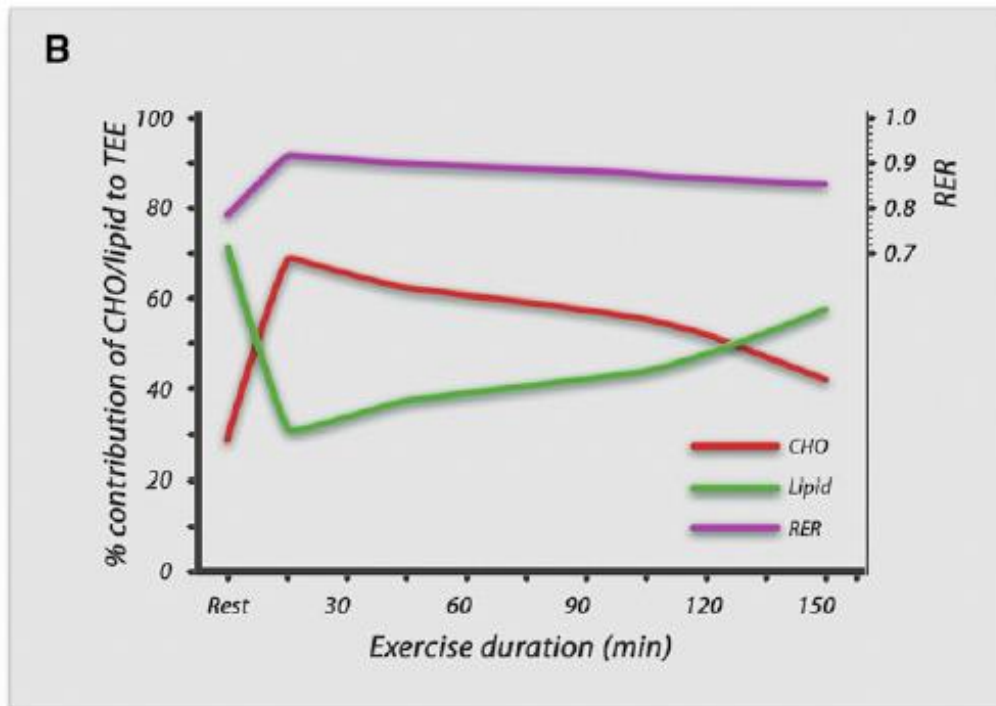
Así, durante ejercicios de intensidad baja-intermedia, los músculos esqueléticos emplean principalmente lípidos, en forma de ácidos grasos libres, procedentes del tejido adiposo vía lipólisis, y también glucosa, procedente tanto de la glucogenólisis hepática como de la ingerida por vía oral (Egan and Zierath, 2013). A medida que la intensidad de la actividad física aumenta, se reduce el metabolismo de lípidos y se incrementa el de glúcidos, concretamente glucosa, disponible en sangre (Egan and Zierath, 2013). En intensidades más elevadas, cercanas a la máxima, se incrementa aún más el empleo de glúcidos como fuente energética a la vez que se reduce de forma significativa el metabolismo de lípidos; pero en este caso, la glucosa procede de las reservas de glucógeno del músculo (Egan and Zierath, 2013).



**Figura 5.** Uso de combustibles según la intensidad del ejercicio. CHO: glúcidos; RER: tasa de intercambio respiratorio. (Egan and Zierath, 2013)

En ejercicios de intensidad intermedia, pero con una duración que supera la hora, se observa un incremento en el uso de lípidos como fuente energética, junto a una reducción en las reservas de glucógeno muscular (Egan and Zierath, 2013). Para intensidades moderadas que llegan a superar los 90 minutos, juegan un papel importante

las reservas de lípidos del músculo esquelético, observándose un incremento en el consumo de los triglicéridos intramusculares (Egan and Zierath, 2013).



**Figura 6.** Uso de combustibles según la duración del ejercicio. CHO: glúcidos; RER: tasa de intercambio respiratorio. (Egan and Zierath, 2013)

Respecto a ejercicios intensos de corta duración, inicialmente se observa el consumo de combustibles por metabolismo tanto aeróbico como anaeróbico para obtener el ATP necesario, con una gran producción de ATP a partir de fosfocreatina en el primer minuto, seguido por un predominio del glucógeno muscular como combustible, y posteriormente se llega a emplear la glucosa que llega al músculo esquelético procedente del hígado (Hargreaves and Spriet, 2020). También se usarían los ácidos grasos procedentes de triglicéridos intramusculares y posteriormente aquellos procedentes del tejido adiposo, pero a unas intensidades menores de ejercicio (Hargreaves and Spriet, 2020).

En cualquier caso, es necesario señalar que se observa una dependencia en aquellos combustibles metabolizados por vía anaeróbica en los primeros momentos de cualquier tipo de ejercicio, correspondientes al paso de un estado de reposo a la realización de un esfuerzo, y que se pueden relacionar con la mayor velocidad de producción de ATP del metabolismo anaeróbico frente al aeróbico; pero tras los primeros

minutos, se observa la predominancia de un metabolismo sobre el otro según la intensidad y duración del ejercicio (Hargreaves and Spriet, 2020).

### **3.2. Ejercicios aeróbicos y anaeróbicos**

Los ejercicios que puede practicar la población son muy diversos, algunos con características semejantes y otros más dispares. Para facilitar el estudio de las consecuencias de distintos ejercicios, se pueden diferenciar estos en dos grandes tipos: de resistencia aeróbica o aeróbicos, y de resistencia anaeróbica o anaeróbicos.

Los de resistencia aeróbica (en inglés, “endurance”), corresponden más bien al término español “resistencia”. Estos ejercicios se desarrollan durante periodos largos pero con una actividad de baja intensidad y con una baja carga mecánica, llegando al 65-75% de  $VO_{2máx}$  (Consitt et al., 2019; Egan and Zierath, 2013).

La práctica de tales ejercicios contribuye a la adaptación muscular por incremento de las fibras de tipo I y IIa, por lo que el músculo se adapta a un metabolismo aeróbico, presentando un incremento en la capacidad oxidativa y un mejor rendimiento al emplear la fosforilación oxidativa (producción de ATP mediante consumo de oxígeno) a fin de obtener energía para la contracción, así como un aumento de sustancias antioxidantes (Consitt et al., 2019; Egan and Zierath, 2013; Hargreaves and Spriet, 2020). Por ello, los músculos emplean como combustibles primeramente la glucosa y los ácidos grasos libres que les llegan de la circulación sanguínea para aquellas intensidades más bajas; y, posteriormente, los procedentes de sus propias reservas, conforme la intensidad se va incrementando (Consitt et al., 2019; Egan and Zierath, 2013; Hargreaves and Spriet, 2020). En general, la adaptación a los ejercicios de resistencia aeróbica permite un aumento de la resistencia frente al cansancio muscular (Consitt et al., 2019; Egan and Zierath, 2013).

Los ejercicios de resistencia anaeróbica (en inglés, “resistance”), corresponden más a los términos españoles “fuerza” o “potencia”. Estos se desarrollan durante periodos cortos de actividad de alta intensidad y con unas elevadas cargas mecánicas, superando el 65-75% de  $VO_{2máx}$  (Consitt et al., 2019; Egan and Zierath, 2013).

Los ejercicios anaeróbicos destacan por provocar la hipertrofia muscular y, en consecuencia, el incremento de la fuerza que pueden producir los músculos, debido al incremento de las fibras musculares de tipo IIa y IIx (Consitt et al., 2019; Evans et al., 2017; Hargreaves and Spriet, 2020). Esta hipertrofia debería observarse especialmente en

las fibras tipo IIx, las cuales, como vimos antes, presentan un metabolismo glucolítico anaeróbico, sin necesidad de oxígeno para obtener energía, siendo explosiva y potente para cortos periodos de tiempo. En este caso, los músculos usan como combustible inicial el glucógeno muscular, predominando su metabolismo anaeróbico, con el consecuente incremento de los niveles de lactato y el cansancio; y conforme la intensidad es mayor, pueden llegar a emplear fosfocreatina, especialmente si es una intensidad elevada durante un periodo corto (Consitt et al., 2019; Theofilidis et al., 2018).

Según la modalidad de resistencia del ejercicio practicada a lo largo del tiempo, así se adaptan los músculos a dicha actividad (Hawley et al., 2018). Es decir, la práctica continuada de ejercicios de resistencia aeróbica incrementa la capacidad y resistencia ante una actividad física, mientras que la práctica continuada de ejercicios de resistencia anaeróbica incrementa la hipertrofia y la capacidad de producir fuerza explosiva. Como ejemplo extremo derivado de esto, nos encontramos con que atletas de élite con un entrenamiento aeróbico pueden presentar unos valores del 80-90% de  $VO_{2m\acute{a}x}$  sin manifestar cansancio (Hawley et al., 2018), lo cual sería indicativo de que es capaz de emplear combustibles metabolizados por vía aeróbica a tal intensidad, o bien metabolizan rápidamente los subproductos de un metabolismo anaeróbico; mientras que personas sin entrenamiento previo se cansan cuando alcanzan valores del 60-65% de  $VO_{2m\acute{a}x}$  (Hawley et al., 2018), por lo que emplearían vías anaeróbicas a intensidades incluso relativamente bajas para un metabolismo anaeróbico, o bien tienen dificultad para un correcto metabolismo aeróbico.

También debemos de señalar que los valores en % de  $VO_{2m\acute{a}x}$ , al observar distintos artículos, son distintos, aunque cercanos, para catalogar la intensidades en bajas, intermedias o elevadas (Consitt et al., 2019; Egan and Zierath, 2013; Hargreaves and Spriet, 2020; Hawley et al., 2018).

### **3.3.HIIT y ultra-resistencia**

Además de esta gran división, actualmente se está incrementando la práctica de otros tipos de ejercicios que se salen un poco de estos dos cánones. En esta ocasión, nos centraremos por un lado en los ejercicios tipo HIIT, y por otro en los ejercicios de ultra-resistencia.

Los ejercicios tipo HIIT (entrenamientos con intervalos de alta intensidad, expresado por sus siglas en inglés), consisten en actividades de corta duración, pero de

elevada intensidad, llegando a alcanzar el 70-90% de  $VO_{2m\acute{a}x}$ , seguidas de periodos intermedios de descanso breve (Ito, 2019). Además, existe una variante dentro de HIIT, que se conoce como SIT (entrenamientos con intervalos de sprint, por sus siglas en inglés), donde se practican ejercicios muy intensos, que llegan a alcanzar una intensidad que supera la señalada para HIIT, de corta duración y con periodos largos de descanso completo (Ito, 2019). Debido a la intensidad, teóricamente, en los ejercicios tipo HIIT se podrían emplear algunas de las reservas energéticas por metabolismo aeróbico en los primeros momentos, pero predominarían aquellas que permitan un metabolismo anaeróbico; mientras que en SIT se emplean solo las reservas energéticas que no precisen de oxígeno para metabolizarse.

Este tipo de ejercicios ha ganado popularidad en los últimos años, ya que se adaptan a la falta de tiempo, tan generalizada en la sociedad actual, para realizar ejercicio. También contribuye a su popularidad la existencia de estudios que señalan beneficios para la salud, aunque existe cierta discrepancia respecto a los cambios metabólicos que provocan en el músculo, dado que pese a ser ejercicios que precisan un metabolismo anaeróbico, algunos estudios señalan que proporcionan mejoras, además de las propias de resistencia anaeróbica, en la capacidad de resistencia aeróbica (Ito, 2019). Ha de tenerse en cuenta que la variante SIT, debido a su elevada intensidad, provoca cambios agudos en la dinámica sanguínea, por lo que no debe practicarse en personas mayores o con patologías previas (Ito, 2019).



| Tipos de ejercicios          | Población objetivo          | Edad |       |     |
|------------------------------|-----------------------------|------|-------|-----|
|                              |                             | <40  | 40-60 | >60 |
| HIIT aeróbico<br>(4 x 4 min) | Atléticos                   | ✓    | ✓     | ✓   |
|                              | Deporte por ocio            | ✓    | ✓     | ✓   |
|                              | Sedentarios                 | ✓    | ✓     | ✓   |
|                              | Enfermedad cardíaca estable | ✓    | ✓     | ✓   |
| SIT clásico                  | Atléticos                   | ✓    | ✓     | ✓   |
|                              | Deporte por ocio            | ✓    | ✓     | ✓   |
|                              | Sedentarios                 | ✓    | ✓     | ⚠   |
|                              | Enfermedad cardíaca estable | ⊘    | ⊘     | ⊘   |
| SIT con esfuerzo reducido    | Atléticos                   | ✓    | ✓     | ✓   |
|                              | Deporte por ocio            | ✓    | ✓     | ✓   |
|                              | Sedentarios                 | ✓    | ✓     | ⚠   |
|                              | Enfermedad cardíaca estable | ⚠    | ⚠     | ⚠   |

**Tabla 2.** Representación de la adaptabilidad de los ejercicios HIIT y SIT a distintos grupos de población. ✓ : puede realizar el ejercicio; ⚠ : requiere adaptación para realizarlo; ⊘ : no debe practicarlo. Adaptado de (Ito, 2019)

En el otro extremo, tenemos los ejercicios de ultra-resistencia, que consisten en la práctica de una actividad continua durante más de 4-6 horas, y, por tanto, con una intensidad leve-moderada (Patton, 2019). Por ello, acorde a la relación entre intensidad y combustibles empleados, vista previamente, el músculo usaría principalmente ácidos grasos libres y glucosa. En estos ejercicios, la provisión de nutrientes resulta muy importante, por lo que la dieta desempeña un papel crucial en el rendimiento (Patton, 2019), como se verá más adelante.

Por tanto, debemos señalar que los cambios en el metabolismo y la musculatura varían no solo en función de la práctica de un ejercicio concreto, sino también en función de los distintos tipos de población, especialmente al comparar entre principiantes y atletas de élite. Además, se añadirían otros factores que alteran dichos cambios en el metabolismo, como la edad y patologías previas.

#### 4. DIETAS Y SUPLEMENTOS EN EL METABOLISMO DEL EJERCICIO

Además de las modificaciones del metabolismo vistas previamente que derivan de los distintos tipos de ejercicio, el papel de la presencia de distintos nutrientes también

resulta importante. Así, estudiaremos cómo ciertas dietas o ciertos suplementos son capaces de provocar cambios en el uso de distintos combustibles en el músculo.

En primer lugar, nos centraremos en esta sección en aquellas dietas y aquellos suplementos que son populares entre la población general. Y para finalizar, presentaremos cómo preparan los atletas de élite sus dietas.

#### **4.1. Dieta cetogénica**

En este contexto, llama especial atención el auge que ha presentado la dieta cetogénica como un método para reducir el peso y mejorar el rendimiento. Esta dieta se basa en una ingesta elevada de lípidos, mientras se reduce el contenido en carbohidratos; y provoca modificaciones en el metabolismo, incrementando la oxidación de grasas durante el ejercicio frente al uso de otros combustibles, llegando, en ocasiones, a disminuir el contenido de glucógeno en los músculos (Hawley and Leckey, 2015). Este cambio en el metabolismo persiste incluso cuando se vuelve a una dieta con una proporción normal de lípidos y carbohidratos (Hawley and Leckey, 2015).

El nombre de esta dieta se debe a que, por el cambio en la cantidad de nutrientes, el organismo comienza a usar cuerpos cetónicos como fuente energética para llevar a cabo actividades físicas (Patton, 2019).

Desde el punto de vista del rendimiento, la dieta cetogénica, que termina en una dependencia elevada de grasas como combustible, por lo general no ofrece beneficios, sino que genera limitaciones, ya que el incremento en el metabolismo de un combustible conlleva la reducción de otro; y, en este caso, se observa una limitación del proceso de glucogenólisis, lo que implica una reducción en la capacidad de producir energía ante ejercicios de alta intensidad (Hawley and Leckey, 2015). Y entre los deportistas, una limitación en el desarrollo de este tipo de ejercicios resulta, por lo general, negativa (Hawley and Leckey, 2015). Además, se ha observado el desarrollo de cetoacidosis por la acumulación de cuerpos cetónicos en sangre tras 2-3 semanas con una dieta cetogénica (Hargreaves and Spriet, 2020).

Sin embargo, en el caso concreto de los atletas de ultra-resistencia, la dieta cetogénica puede resultar especialmente útil. Recordemos que este tipo de ejercicio se caracteriza por un periodo especialmente largo de actividad (superando las 4-6 horas) de intensidad relativamente baja. Dado que no se enfrentan a ejercicios de alta intensidad, la mayoría de las limitaciones provocadas por la dieta cetogénica, a diferencia de otros

deportistas, no les afecta; y en su lugar se benefician de una serie de ventajas: evitar el colapso por pérdida de las reservas de glucógeno durante la competición, reducción notable en el consumo de carbohidratos como fuente de energía, y aporte energético suficiente para todo el evento por la tasa de consumo de grasas y la cantidad corporal disponible (Hawley and Leckey, 2015). No obstante, escasean estudios que contemplen en detalle factores de interés, como el riesgo de lesiones o la capacidad real de entrenamiento y recuperación, e incluso estudios exhaustivos del rendimiento (Hawley and Leckey, 2015).

## **4.2. Suplementos dietéticos**

También se puede observar un auge entre la población en general del uso de diversos suplementos para mejorar el rendimiento durante el ejercicio e incrementar el desarrollo muscular. Si bien la diversidad de estos es amplia, nos centraremos en dos grupos, los antioxidantes y los suplementos de proteínas.

### *4.2.1. Antioxidantes*

Los antioxidantes son sustancias que permiten al organismo reducir los niveles de especies reactivas de oxígeno, las cuales pueden provocar diversos daños en células y tejidos. Dadas las características de la actividad muscular, es posible que se generen altos niveles de estas especies reactivas, y que sea necesario contar con una cantidad acorde de antioxidantes. De hecho, en aquellas fibras musculares en las que predomina un metabolismo aeróbico, especialmente las fibras tipo I, se observa un mayor contenido en factores antioxidantes que en las que predomina el metabolismo anaeróbico, como las fibras tipo IIx (Qaisar et al., 2016). Es así como se llega a la idea de que el suplemento de antioxidantes en la dieta puede ayudar al rendimiento del ejercicio.

Lo cierto es que los estudios sobre el uso de antioxidantes, en relación con sus beneficios para la actividad física, presentan resultados diversos. Así, algunos autores (Baldelli et al., 2019), consideran que suplementos de los precursores de los antioxidantes aportan mejoras en la capacidad de homeostasis antes y tras el ejercicio, resultando beneficiosos; mientras que el uso de los antioxidantes directos durante el ejercicio bloquean las adaptaciones propias del músculo, resultando en consecuencia contraproducentes. Otros autores, sin embargo, consideran que la suplementación de antioxidantes simplemente no es necesaria para la mejora del rendimiento muscular (Gomes et al., 2017). Y también nos encontramos con algunos que señalan que la ingesta de antioxidantes no mejora el rendimiento del ejercicio, al impedir el desarrollo de

adaptaciones en el músculo, pero sí atenúa el cansancio muscular en ejercicios agotadores y/o prolongados (Hargreaves and Spriet, 2020).

#### 4.2.2. *Suplementación proteica*

La suplementación proteica constituye un hábito bastante común entre las personas que asisten a gimnasios con el objetivo de lograr hipertrofia muscular. Dado que las estructuras musculares están hechas a base de proteína, es aceptable considerar que un incremento en la ingesta de proteínas puede, junto a la práctica de ejercicio anaeróbico, incrementar el volumen muscular. Sin embargo, esta premisa tiene una serie de límites, los cuales desarrollamos a continuación.

El primer punto para tener en cuenta es que existe un límite en la ingesta de proteínas y su utilidad para incrementar la hipertrofia. Así, según ciertos estudios, superar una ingesta de proteínas total de 1,6-2,4 g/kg al día, entre atletas y personas que practican algún deporte, no aporta un incremento en la síntesis proteica del músculo, sino que incentiva la degradación de proteínas en otros metabolitos más útiles, por ejemplo, para la obtención de energía (Stokes et al., 2018). Es cierto que este límite puede presentar ligeras variaciones acorde principalmente a los ejercicios practicados, e incluso también al nivel de adaptación del organismo a la realización de tales ejercicios (Stokes et al., 2018). Otros estudios, sin embargo, colocan el límite en el valor de 1,6 g/kg al día; y si bien mantienen la posibilidad de desviaciones de este valor según la población, en este caso dichas variaciones están en función tanto de la experiencia en el ejercicio como de la edad de los individuos (Stokes et al., 2018).

Otra cuestión común respecto a la suplementación proteica consiste en saber cuál es el mejor momento para aplicarla. Si bien se pueden escuchar entre la población deportista general opinar sobre el momento más adecuado de la ingesta proteica para obtener de ella los mayores beneficios, como puede ser justo tras el ejercicio, o centrar toda la ingesta de proteínas por la noche antes de dormir, lo cierto es que en la literatura científica encontramos que resulta más efectivo espaciar las tomas de proteínas unas 3-5 horas, con una toma ligeramente superior antes de dormir (Stokes et al., 2018). Sin embargo, ciertos estudios señalan que, con la simple cumplimentación de la dosis proteica diaria adaptada a la práctica del deporte, indistintamente de su momento, ya es suficiente para obtener beneficios (Stokes et al., 2018).

Debemos señalar que, si bien los estudios encontrados en relación con la dosis y la pauta de ingesta proteica son aplicables a la población deportista en general, la mayoría han sido realizados en atletas que no compiten en eventos de élite. Esto se traduce en una disparidad de las conclusiones encontradas, así como conclusiones que podrían no ser correctas para toda la población.

#### *4.2.3. Creatina*

La creatina es un compuesto derivado de aminoácidos, procedentes de proteínas, y que, como vimos, es precursor del combustible fosfocreatina. Constituye uno de los suplementos dietéticos más empleados, aunque especialmente entre deportistas de competición y más importante en aquellos de élite (Hargreaves and Spriet, 2020). Se ha observado que una suplementación de creatina a corto plazo en la dieta provoca un incremento en el contenido total tanto de creatina como de fosfocreatina, e incluso en algunos estudios se sugiere un incremento de la fuerza y la masa muscular asociado a esta (Hargreaves and Spriet, 2020). Sin embargo, se debe señalar que el incremento en las reservas de fosfocreatina aporta beneficios solo en la práctica de ejercicios anaeróbicos (Hargreaves and Spriet, 2020).

### **4.3. Dietas en atletas de élite**

A continuación, procedemos a un estudio de la diversidad de dietas empleadas por deportistas de élite, con el objetivo de obtener un mayor rendimiento en sus distintos eventos competitivos. Para facilitar este estudio, lo hemos acotado a solo unos deportes en concreto.

#### *4.3.1. Velocistas*

Se diferencian de otros corredores por competir en carreras de corta o media distancia con el objetivo de terminarlas en el menor tiempo posible (Slater et al., 2019). Entre las características comunes de los velocistas, destaca que presentan mayor musculatura, y, por tanto, son más pesados, respecto a otros corredores (Slater et al., 2019). Sus entrenamientos van dirigidos a mejorar la capacidad de generar fuerza en los músculos, lo que se traduce en buscar la hipertrofia muscular (Slater et al., 2019).

La nutrición de estos velocistas pretende maximizar el abastecimiento de combustibles tanto en la fase de actividad como en la de recuperación, conseguir la mejor relación potencia-peso para mejorar su capacidad de aceleración, y lograr unos niveles bajos en grasa (Slater et al., 2019). Existen ciertas diferencias en el nutriente esencial

según los distintos tipos de carreras; así, para carreras cortas, estos atletas buscan optimizar el uso de fosfocreatina, mientras que, en carreras de media distancia, procuran amortiguar la acidosis derivada de la producción de lactato (Slater et al., 2019). Sin embargo, también presentan otros puntos comunes en su dieta, como la ingesta de carbohidratos junto a proteínas tras los entrenamientos, lo que les aporta sinergia al aumentar tanto la restauración de las reservas de glucógeno como el metabolismo de síntesis proteica (Slater et al., 2019).

#### 4.3.2. *Atletas explosivos*

A continuación, nos centraremos en los atletas explosivos: saltadores, lanzadores y decatletas. Si bien se observan diferencias en las dietas entre unos y otros, estos atletas presentan características comunes como son la búsqueda de optimización en la relación potencia-peso, el desarrollo de las fibras de tipo II y lograr una mayor capacidad para explosiones cortas de poca energía (Sygo et al., 2019).

##### 4.3.2.1. Saltadores

Los saltadores, por las características propias de su ejercicio, se benefician de una reducción en la masa corporal, por lo que optan por una dieta elevada en proteínas, que permita una mayor hipertrofia, y baja en carbohidratos, tal que suplan las necesidades energéticas (Sygo et al., 2019). A principio de temporada, estos atletas tienen entrenamientos de elevado volumen e intensidad, por lo que optan por una ingesta más elevada de carbohidratos respecto al resto de la temporada (Sygo et al., 2019). Conforme esta avanza, reducen el volumen y la intensidad de los ejercicios, y en consecuencia disminuyen la ingesta de carbohidratos (Sygo et al., 2019). Esta reducción de carbohidratos puede presentarse incluso cuando llega el momento de la competición (Sygo et al., 2019). Respecto a las proteínas, por el objetivo de la hipertrofia, mantienen siempre una ingesta elevada; y en el momento de la competición, prefieren aplicar dosis pequeñas y frecuentes que les ayude a reducir el daño muscular (Sygo et al., 2019). Algunos pueden llevar a cabo periodos de déficit energético moderado para lograr la máxima relación potencia-peso; sin embargo, esto puede provocar una disminución del rendimiento y un mayor incremento en el riesgo de lesiones, por lo que se debería tener especial precaución en ese periodo (Sygo et al., 2019).

##### 4.3.2.2. Lanzadores

Los tiradores o lanzadores también se benefician de un incremento en la masa corporal. En este caso, dado que hay una mayor implicación de todo el cuerpo en el

lanzamiento, siguen una dieta con altas cantidades de proteínas, superiores a las tomadas por saltadores, y baja en carbohidratos (Sygo et al., 2019). El objetivo principal de los lanzadores es optimizar la síntesis proteica para lograr la hipertrofia de los músculos implicados en el lanzamiento (Sygo et al., 2019). Como ya señalamos anteriormente, existe un límite a partir del cual una mayor ingesta de proteínas no se traduce en un mayor desarrollo de hipertrofia. Además, es importante señalar, que, si bien el incremento de masa corporal les beneficia, lo logran con un incremento de la ingesta energética global, pero especialmente en proteínas, y, en cualquier caso, con un perfil lipídico desfavorable (Sygo et al., 2019).

#### 4.3.2.3. Decatletas

Estos se caracterizan por enfrentarse a competiciones diversas que dificultan la optimización de la dieta y el metabolismo para todas ellas (Sygo et al., 2019). Así, en los eventos de lanzamientos y carreras cortas, el objetivo con la dieta y el ejercicio es lograr un equilibrio óptimo entre fuerza y masa corporal, mientras que en los eventos de saltos y carreras de media distancia se centran en reducir la masa corporal (Sygo et al., 2019).

Estos atletas presentan durante la pretemporada una alta carga de ejercicios tanto de resistencia aeróbica como de resistencia anaeróbica, por lo que durante este periodo precisan de una adecuada disponibilidad de combustibles, principalmente en forma de carbohidratos (Sygo et al., 2019). Durante la temporada se tienen que ir adaptando según el tipo de eventos, como ya mencionamos. Y al final de la temporada, por el contrario, optan por un incremento en la ingesta proteica (Sygo et al., 2019). En estos atletas hay dos aspectos a tener especialmente en cuenta; en primer lugar, la diversidad de eventos, debido a lo cual gana importancia la capacidad de estos atletas para realizar una pérdida aguda de peso en mitad del periodo de competición; y en segundo, los periodos con máxima carga de entrenamiento, que superan por mucho la carga de los anteriores atletas estudiados, por lo que presentan tomas de tentempiés de carbohidratos y proteínas para suplir sus necesidades energéticas y así evitar una reducción del rendimiento o un incremento del riesgo de lesiones (Sygo et al., 2019).

#### 4.3.3. Ultramaratón

Si bien un decatlón entra dentro de los diversos eventos que comprende el término de ultra resistencia (Nikolaidis et al., 2018), por su diversidad de pruebas presenta diferencias notables respecto a, por ejemplo, una ultramaratón, tanto en las características de los músculos implicados como en las dietas aplicadas para mejorar el rendimiento.

El concepto de ultramaratón involucra diversidad de carreras, tanto en relación a la distancia, siempre superiores a las de una maratón (42,2 km), como al tiempo de carrera, superando por lo general las seis horas (Knechtle and Nikolaidis, 2018). Pero en todas destaca la capacidad de los corredores respecto a la resistencia aeróbica y la dificultad de cumplir con las necesidades energéticas para llevarlas a cabo (Knechtle and Nikolaidis, 2018; Tiller et al., 2019).

En una ultramaratón, dado el objetivo de larga distancia o amplio tiempo de carrera, predomina un metabolismo aeróbico, con intensidades de ejercicio bajas. Derivado de esto, este tipo de corredores presentan una alta dependencia de glucógeno y grasas, siendo el principal punto de desarrollo de sus dietas; pero también resulta importante el papel de las proteínas, especialmente ante la carencia energética que se observa en estos eventos (Tiller et al., 2019).

Respecto a las dietas que siguen los corredores de ultramaratón en sus períodos de entrenamiento previos a la carrera, podemos encontrar una gran diversidad (Nikolaidis et al., 2018; Tiller et al., 2019). En su mayoría, consisten en una reducción en la ingesta de carbohidratos durante los entrenamientos, con el objetivo de que el organismo adapte su metabolismo a un consumo relativamente bajo de carbohidratos, en comparación a otros macronutrientes, para así poder mantener el ritmo durante un mayor tiempo de carrera (Nikolaidis et al., 2018; Tiller et al., 2019). Sin embargo, se observa que la práctica crónica de entrenamientos en condiciones en las que escasea el glucógeno conlleva una reducción del rendimiento; algo también observable al practicar entrenamientos de elevada intensidad, o en días contiguos sin suficiente tiempo de descanso (Nikolaidis et al., 2018; Tiller et al., 2019).

También se observa un incremento en la ingesta de grasas durante el entrenamiento, con el objetivo de estimular al organismo para aumentar la oxidación de grasas frente al glucógeno, y así ayudar a incrementar el rendimiento al retrasar el vaciado de reservas de glucógeno en el momento de carrera (Knechtle and Nikolaidis, 2018). Aquí es donde juega un papel importante la dieta cetogénica, en la que predomina la ingesta calórica de grasas a costa de una reducción considerable en la ingesta de carbohidratos; esto resultaría en un incremento del metabolismo de las grasas, y una adaptación en el uso eficiente de los cuerpos cetónicos (Tiller et al., 2019). Sin embargo, esta adaptación es lenta, en el orden de semanas e incluso meses, y aunque se ha observado en estudios, con corredores en cinta durante 3 horas, una mayor oxidación de grasas en atletas



acostumbrados a dicha dieta frente a los que tienen una dieta más rica en carbohidratos, no se puede concluir que aporten un beneficio en el rendimiento (Tiller et al., 2019). Además, con esta dieta pueden desarrollarse efectos adversos, como la aparición de cansancio o poca capacidad de concentración (Tiller et al., 2019), y también el desarrollo de cetoacidosis observable a partir de la tercera semana por acumulación de cuerpos cetónicos (Hargreaves and Spriet, 2020). Sin embargo, dadas las diferencias posibles entre los estudios realizados en unas condiciones más controladas, y la variedad de condiciones reales que suponen las distintas ultramaratonés, se necesitaría más investigación a fin de confirmar la utilidad, o la ineficacia, de aplicar dietas cetogénicas en corredores de ultramaratón para mejorar su rendimiento.

En cuanto a las proteínas en las dietas de entrenamiento, se aplica lo observado en apartados anteriores, siendo aceptable consumir  $>1,6$  g/kg al día si existe una demanda elevada de entrenamiento, y solo superando ligeramente los 2,4 g/kg al día si el atleta lo necesitara. Pero en los estudios realizados, se observa que superando los 2,1 g/kg al día de proteínas, más que emplearse para una síntesis proteica que recupere el músculo de posibles daños en el entrenamiento, se destinan al consumo energético (Tiller et al., 2019).

En carrera, el objetivo de los corredores de finalizarla se traduce en minimizar el déficit energético, y por esto los corredores que presentan una mayor ingesta calórica, procedente de todos los macronutrientes, y reposición de líquidos durante la competición cuentan con más probabilidades de finalizarla con éxito (Tiller et al., 2019). Respecto a los carbohidratos, se observa que conforme va aumentando la distancia recorrida, se reduce su consumo a costa de aumentar el de grasas como fuente energética (Knechtle and Nikolaidis, 2018). Más concretamente, en una ultramaratón se observa una reducción en el uso de carbohidratos durante las primeras ocho horas, junto a un aumento del consumo de grasas y una reducción del ritmo de carrera (Tiller et al., 2019). Pero pasadas esas horas, el consumo de carbohidratos permanece estable (Tiller et al., 2019). En cualquier caso, el consumo de carbohidratos durante una ultramaratón es relativamente elevado respecto a otras carreras (Tiller et al., 2019). Debido a este elevado consumo los corredores, además de las ingestas en carrera, suelen tomar una comida rica en carbohidratos y fácil de digerir el mismo día de la competición, aunque suficientemente alejadas de la misma, para asegurar que dichos carbohidratos se almacenen en hígado para su posterior uso y no se metabolizan en el músculo (Tiller et al., 2019).

Respecto a las grasas, además de lo mencionado en el párrafo anterior, un incremento de su ingesta durante la carrera ayuda a reducir el consumo del glucógeno muscular y evita una bajada del rendimiento e incluso el desarrollo de hipoglucemia, situación que impediría completar la prueba (Tiller et al., 2019). Además, el uso de comidas ricas en grasas durante una ultramaratón se traduce en comidas que pesan menos y aportan más energía, lo cual presenta beneficios claros para estos atletas, ya que les permite correr con menor aumento de peso frente a comidas ricas en carbohidratos (Tiller et al., 2019).

La ingesta proteica durante la carrera no suele ser un factor en el que se fijan especialmente los corredores de ultramaratón, por el poco papel energético que juegan frente a grasas y carbohidratos (Tiller et al., 2019). Sin embargo, parece que un incremento en la ingesta proteica permite reducir el daño muscular, tan acusado en una ultramaratón, e incluso aportar beneficios en el metabolismo energético (Tiller et al., 2019). De hecho, se contempla el uso de suplementos de aminoácidos de cadena ramificada para aquellos corredores que lo requieran (Tiller et al., 2019). Se considera que estos aminoácidos, además de servir como una fuente energética, pueden reducir la sensación de cansancio y de esfuerzo cuando se toman en suficiente medida, lo cual ayudaría a los corredores en el mantenimiento de un buen rendimiento durante mayor tiempo; sin embargo, respecto a este último aspecto se requerirían más estudios para comprobar que realmente mejoran el rendimiento en corredores de ultramaratón (Tiller et al., 2019).

En cuanto a otros aspectos de la dieta en ultramaratón, debemos señalar que no se observan beneficios en el rendimiento con la ingesta de antioxidantes ni durante los entrenamientos ni durante la carrera (Nikolaidis et al., 2018; Tiller et al., 2019). También debemos mencionar que no es raro encontrar corredores que no toman todos los nutrientes necesarios debido a que desarrollan malestar intestinal tras comer durante la carrera, ante lo cual se debería practicar también la ingesta de nutrientes durante carrera en los entrenamientos (Tiller et al., 2019). Y por último, debemos señalar que los entrenamientos previos para la ultramaratón resultan más beneficiosos que confiar solo en la suplementación de nutrientes durante la carrera (Knechtle and Nikolaidis, 2018).

Por tanto, es muy importante en los atletas de ultramaratón la cuestión de su dieta, con el objetivo de presentar un correcto metabolismo energético durante todo el tiempo que dure el recorrido de este tipo de carreras. Sin embargo, no se debe dejar de lado el

entrenamiento físico, siendo lo ideal combinar ambos para que el cuerpo esté más acostumbrado a la situación con que se encuentra en estos eventos, y por tanto estar más capacitado para completar la carrera, reduciendo en todo lo posible las consecuencias negativas que puedan derivar de tal proeza.

| Eventos deportivos | Glúcidos   | Lípidos   | Proteínas  |
|--------------------|------------|-----------|------------|
| Velocistas         | Principal  | Necesario | Importante |
| Saltadores         | Importante | Necesario | Principal  |
| Lanzadores         | Necesario  | Necesario | Principal  |
| Decatletas         | Principal  | Necesario | Importante |
| Ultramaratón       | Importante | Principal | Importante |

*Tabla 3. Resumen de la importancia de glúcidos, lípidos y proteínas según los eventos deportivos. Principal: clave para un buen rendimiento; importante: adquiere importancia en ciertas situaciones ayudando a lograr un buen rendimiento; necesario: su presencia evita una disminución del rendimiento, aunque no predomina especialmente en la dieta. Tabla de creación propia a partir del texto elaborado.*

## V. CONCLUSIONES

El músculo esquelético, responsable de toda actividad física, cuenta con diversidad de combustibles metabólicos, algunos totalmente dependientes de oxígeno, como son las grasas, los cuerpos cetónicos y los aminoácidos de cadena ramificada; otros independientes del oxígeno, como la fosfocreatina; y otros que pueden oscilar en su dependencia de oxígeno, como la glucosa. Estos distintos combustibles los emplea el músculo según la intensidad y el tiempo de desarrollo de los diferentes ejercicios.

Existen dos factores clave para lograr una adaptación del músculo esquelético a las distintas actividades físicas: por un lado, el entrenamiento o la propia práctica del ejercicio, y por otro, la dieta que, al proporcionar y restringir una serie de nutrientes, obliga al músculo a adaptarse a usar aquellos combustibles de los que dispone.

Dado que la realización de un ejercicio concreto lleva al músculo a la adaptación al mismo, se puede asumir que todos los ejercicios que por sus características se consideran de resistencia aeróbica (usan combustibles que consumen oxígeno), contribuyen a mejorar la resistencia al cansancio; y los considerados de resistencia anaeróbica (usan combustibles que no precisan de oxígeno), permiten una mejora en la capacidad de generar fuerza explosiva.

No todos los métodos que puede emplear la población general que practica un deporte, con el objetivo de mejorar su rendimiento o incrementar su masa muscular, están corroborados por la ciencia.

En este contexto, la dieta cetogénica presenta beneficios teóricos solo para los ultra atletas, dado que estimula el metabolismo de aquellos combustibles disponibles a baja intensidad, a costa de reducir la capacidad metabólica de los músculos respecto a intensidades más elevadas de ejercicio.

Por su parte, el uso de suplementos antioxidantes tan solo podría presentar beneficios si se trata de los precursores de los antioxidantes y se administran en momentos alejados del propio ejercicio, y aun así sigue siendo un tema de discusión.

También podemos encontrar el incremento de la ingesta proteica con el objetivo de desarrollar la hipertrofia muscular, algo aceptado en consenso hasta una ingesta de 1,6 g/kg al día entre atletas, pero en discusión respecto a las consecuencias de ingestas superiores, así como respecto a la dosificación.

También debemos mencionar la suplementación de creatina, un precursor de uno de los combustibles, que ofrece beneficios en la práctica de ejercicios de resistencia anaeróbica.

En atletas de élite, el papel de la dieta es tan crucial que adaptan la ingesta de nutrientes conforme a su entrenamiento, siempre con el objetivo de lograr el éxito competitivo. Además, dada la diversidad de competiciones, cada entrenamiento y cada dieta resultan distintos según el evento deportivo, e incluso según cada atleta.

Aunque la dieta, y, en consecuencia, la presencia de distintos combustibles metabólicos, puede regular la capacidad del organismo ante una actividad física, el método más idóneo para la mejora del metabolismo y la capacidad de nuestros músculos esqueléticos ante un esfuerzo se basa en la combinación de dieta y ejercicio adecuados a los distintos deportes que queramos desarrollar.

Por último, debemos señalar la necesidad de más estudios, y más cercanos a las condiciones reales, especialmente en el campo de la competición, para valorar la incidencia de todas las técnicas dietéticas en el desarrollo de las actividades físicas. Así como realizar estos estudios también a la población general, con el objetivo de comprobar si los beneficios observados en los atletas son extrapolables al resto de la población.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Baldelli S, Ciccarone F, Limongi D, Checconi P, Palamara AT, Ciriolo MR. Glutathione and nitric oxide: Key team players in use and disuse of skeletal muscle. *Nutrients* 2019;11:1–18. <https://doi.org/10.3390/nu11102318>.
- Bytowski JR. Fueling for Performance. *Sports Health* 2018;10:47–53. <https://doi.org/10.1177/1941738117743913>.
- Cantrell CB, Mohiuddin SS. *Biochemistry, Ketone Metabolism*. StatPearls Publishing; 2020.
- Consitt LA, Dudley C, Saxena G. Impact of endurance and resistance training on skeletal muscle glucose metabolism in older adults. *Nutrients* 2019;11:1–17. <https://doi.org/10.3390/nu11112636>.
- Egan B, Zierath JR. Exercise metabolism and the molecular regulation of skeletal muscle adaptation. *Cell Metab* 2013;17:162–84. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2012.12.012>.
- Evans M, Cogan KE, Egan B. Metabolism of ketone bodies during exercise and training: physiological basis for exogenous supplementation. *J Physiol* 2017;595:2857–71. <https://doi.org/10.1113/JP273185>.
- Evans PL, McMillin SL, Weyrauch LA, Witczak CA. Regulation of skeletal muscle glucose transport and glucose metabolism by exercise training. *Nutrients* 2019;11:1–24. <https://doi.org/10.3390/nu11102432>.
- García-Ferrando M, Llopis-Goig R. Encuesta sobre los hábitos deportivos en España 2010 - Ideal democrático y bienestar personal. 2010.
- Gomes MJ, Martinez PF, Pagan LU, Damatto RL, Cezar MDM, Lima ARR, et al. Skeletal muscle aging: Influence of oxidative stress and physical exercise. *Oncotarget* 2017;8:20428–40. <https://doi.org/10.18632/oncotarget.14670>.
- Guimarães-Ferreira L. Role of the phosphocreatine system on energetic homeostasis in skeletal and cardiac muscles. *Einstein (Sao Paulo)* 2014;12:126–31. <https://doi.org/10.1590/S1679-45082014RB2741>.
- Guyton AC. *Tratado de fisiología médica*. 11ª ed. Madrid [Etc: Elsevier; 2010].
- Hargreaves M, Spriet LL. Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nat Metab*

2020;2:817–28. <https://doi.org/10.1038/s42255-020-0251-4>.

Hawley JA, Leckey JJ. Carbohydrate Dependence During Prolonged, Intense Endurance Exercise. *Sport Med* 2015;45:5–12. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0400-1>.

Hawley JA, Lundby C, Cotter JD, Burke LM. Maximizing Cellular Adaptation to Endurance Exercise in Skeletal Muscle. *Cell Metab* 2018;27:962–76. <https://doi.org/10.1016/j.cmet.2018.04.014>.

Heydemann A. Skeletal muscle metabolism in duchenne and becker muscular dystrophy—implications for therapies. *Nutrients* 2018;10:1–25. <https://doi.org/10.3390/nu10060796>.

Ito S. High-intensity interval training for health benefits and care of cardiac diseases - The key to an efficient exercise protocol. *World J Cardiol* 2019;11:171–88. <https://doi.org/10.4330/wjc.v11.i7.171>.

Knechtle B, Nikolaidis PT. Physiology and pathophysiology in ultra-marathon running. *Front Physiol* 2018;9. <https://doi.org/10.3389/fphys.2018.00634>.

Kuo IY, Ehrlich BE. Signaling in muscle contraction. *Cold Spring Harb Perspect Biol* 2015;7:1–15. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a006023>.

McGlory C, Devries MC, Phillips SM. Skeletal muscle and resistance exercise training; The role of protein synthesis in recovery and remodeling. *J Appl Physiol* 2017;122:541–8. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00613.2016>.

Ministerio de Educación Cultura y Deporte. Encuesta de Hábitos Deportivos en España 2015. *Boletín Of Del Estado* 2015:25.

Nelson DL. *Lehninger : principles of biochemistry* . 6th ed. New York: W. H. Freeman and Co; 2013.

Nikolaidis PT, Veniamakis E, Rosemann T, Knechtle B. Nutrition in ultra-endurance: State of the art. *Nutrients* 2018;10. <https://doi.org/10.3390/nu10121995>.

Patton K. Fueling and recovery. *Sports Med Arthrosc* 2019;27:22–4. <https://doi.org/10.1097/JSA.0000000000000213>.

Qaisar R, Bhaskaran S, Van Remmen H. Muscle fiber type diversification during exercise and regeneration. *Free Radic Biol Med* 2016;98:56–67.

<https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2016.03.025>.

Slater GJ, Sygo J, Jorgensen M. Sprinting. . . Dietary approaches to optimize training adaptation and performance. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2019;29:85–94.  
<https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0273>.

Stokes T, Hector AJ, Morton RW, McGlory C, Phillips SM. Recent perspectives regarding the role of dietary protein for the promotion of muscle hypertrophy with resistance exercise training. *Nutrients* 2018;10. <https://doi.org/10.3390/nu10020180>.

Sygo J, Killer SC, Glass AK, Stellingwerff T. Fueling for the field: Nutrition for jumps, throws, and combined events. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* 2019;29:95–105.  
<https://doi.org/10.1123/ijsnem.2018-0272>.

Theofilidis G, Bogdanis G, Koutedakis Y, Karatzaferi C. Monitoring Exercise-Induced Muscle Fatigue and Adaptations: Making Sense of Popular or Emerging Indices and Biomarkers. *Sports* 2018;6:153. <https://doi.org/10.3390/sports6040153>.

Tiller NB, Roberts JD, Beasley L, Chapman S, Pinto JM, Smith L, et al. Nutritional considerations for single-stage ultra-marathon training and racing. *J Int Soc Sports Nutr* 2019;16:1–23.