



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

TÍTULO:

COMPUESTOS QUE DISMINUYEN LA FATIGA EN EL CICLISMO DE RUTA
PROFESIONAL: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

AUTORA DEL TRABAJO:

EVA MARÍA ARGUEDAS ABAD

GRADO DE NUTRICIÓN HUMANA Y DIETÉTICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD Y DEL DEPORTE

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

TUTORA:

IVA MARQUES LOPES

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

ÁREA:

NUTRICIÓN Y BROMATOLOGÍA

Resumen

El ciclismo de ruta profesional es un deporte de resistencia extrema. De no existir una adecuada estrategia entrenamiento-competición-recuperación, los deportistas irán acumulando fatiga residual, encontrándose a un paso de la fatiga crónica o síndrome de sobreentrenamiento deportivo. No existe un tratamiento propiamente dicho para esta condición, si bien, la adopción de medidas protectoras, entre las que se incluyen las estrategias de suplementación con ayudas nutricionales ergogénicas, pueden retardar su aparición o disminuir su duración. Actualmente, numerosos investigadores se han dedicado a estudiar los efectos ergogénicos de diferentes compuestos nutricionales, capaces de mejorar el rendimiento y/o la fatiga a través de la modulación de los aspectos centrales o periféricos de esta última.

El objetivo de esta revisión fue revisar una serie de ensayos experimentales, recogiendo de cada uno de ellos la información sobre el posible efecto ergogénico que pueden tener determinadas sustancias nutricionales sobre el ciclismo de ruta profesional, orientándolo a la disminución de la fatiga. Los compuestos y/o sustancias analizados son: la creatina, el zumo de remolacha, la β -alanina, el bicarbonato de sodio, la cafeína y las bebidas y/o geles de carbohidratos. Todos ellos pertenecen a la clase A de la clasificación de Instituto Australiano del Deporte (AIS, por sus siglas en inglés), lo que se traduce en que han demostrado con un alto nivel de evidencia científica su efecto ergogénico en ciertas modalidades de ejercicio cuando se toman en las cantidades apropiadas.

En definitiva, el análisis de los distintos estudios recopilados, ha reflejado que todos y cada uno de los compuestos nutricionales evaluados, cuando se ingieren en las dosis adecuadas, han demostrado tener un efecto ergogénico sobre distintas modalidades de ejercicio, las cuales tienen lugar durante la práctica del ciclismo de ruta profesional. A pesar de que algunos de ellos no están directamente relacionados con la fatiga, la estrecha relación entre esta última y el rendimiento hace que su suplementación sea una herramienta útil para lograr una reducción de la misma. Sin embargo, tanto las características propias del individuo como las del ambiente que lo rodea son las principales responsables de que el efecto ergogénico propio de cada una de las sustancias se manifieste o no tras la suplementación.

Índice

1. Introducción a la fatiga en el ciclismo de ruta profesional	Página 6
1.1 <i>Concepto de fatiga</i>	<i>Página 6</i>
1.2 <i>Clasificación de la fatiga</i>	<i>Página 6</i>
1.2.1 <i>Tipos de fatiga según el tiempo de aparición</i>	<i>Página 6</i>
1.2.2 <i>Tipos de fatiga según el lugar de aparición</i>	<i>Página 7</i>
1.3 <i>La fatiga como factor limitante del rendimiento</i>	<i>Página 9</i>
1.4 <i>La fatiga en el ciclismo de ruta profesional</i>	<i>Página 10</i>
2. Nutrición y fatiga	Página 12
3. Interés de la revisión	<i>Página 14</i>
3.1 <i>Creatina</i>	<i>Página 14</i>
3.2 <i>Zumo de remolacha</i>	<i>Página 15</i>
3.3 <i>β-alanina</i>	<i>Página 15</i>
3.4 <i>Bicarbonato de sodio</i>	<i>Página 16</i>
3.5 <i>Cafeína</i>	<i>Página 16</i>
3.6 <i>Bebidas y/o geles de carbohidratos</i>	<i>Página 17</i>
4. Objetivos del trabajo	Página 18
5. Material y métodos	Página 19
5.1 <i>Criterios de selección de artículos</i>	<i>Página 19</i>
5.2 <i>Estrategia de búsqueda</i>	<i>Página 19</i>
6. Resultados y discusión	Página 21
6.1 <i>Creatina</i>	<i>Página 21</i>
6.2 <i>Zumo de remolacha</i>	<i>Página 25</i>
6.3 <i>β-alanina</i>	<i>Página 31</i>
6.4 <i>Bicarbonato de sodio</i>	<i>Página 36</i>
6.5 <i>Cafeína</i>	<i>Página 40</i>
6.6 <i>Bebidas y/o geles de carbohidratos</i>	<i>Página 45</i>
7. Conclusiones	Página 50
8. Bibliografía	Página 51

Listado de abreviaturas

AIS: Australian Institute of Sport
BC: bebida de carbohidratos
BCP: bebida de carbohidratos y proteína
B1: bebida 1
B2: bebida 2
B3: bebida 3
CAF: cafeína
CHO: hidratos de carbono
CK: creatinquinasa
CM: monohidrato de creatina
Cr: creatina
EI: entrenamiento intenso
EMG: electromiografía
EN: entrenamiento normal
ER: entrenamiento de recuperación
g: gramo
h: hora
H⁺: iones de hidrógeno
HCO₃⁻: bicarbonato
km: kilómetro
LT: umbral de lactato
m: metro
MC: masa corporal
mg: miligramo
min: minuto
ml: mililitro
MLG: masa libre de grasa
NaHCO₃: bicarbonato de sodio
NO: óxido nítrico
NO₂: nitrito
NO₃⁻: nitrato inorgánico
PCr: fosfocreatina
P1: protocolo 1
P2: protocolo 2
P3: protocolo 3
RPE: percepción subjetiva de esfuerzo



s: segundo

SNC: sistema nervioso central

Tmax: tiempo hasta el agotamiento

T1: tiempo 1

T2: tiempo 2

T3: tiempo 3

VO₂: consumo de oxígeno

VO_{2max}: consumo máximo de oxígeno

WanT: Test anaeróbico de Wingate

β-ALA: β-alanina

1. Introducción a la fatiga en el ciclismo de ruta profesional

1.1 Concepto de fatiga

Desde un punto de vista general, la fatiga se define como la imposibilidad física, psíquica u orgánica para continuar un trabajo al mismo ritmo que se venía realizando y que resulta reversible con el reposo (a diferencia de ciertas condiciones patológicas). Es una sensación desagradable sentida y vivida por el sujeto que la refiere, asociada a una serie de características físicas y químicas objetivas [1]. En el contexto de esta revisión, el término fatiga se refiere a las sensaciones de cansancio y a las disminuciones en el rendimiento y la función muscular asociadas [2]. El grado de fatiga soportado presenta diferencias entre individuos y depende, en gran medida, del grado de entrenamiento y de la condición física, del respaldo psicológico y motivación de cada deportista [1]. No existe un mecanismo global responsable de la fatiga [3]. Los mecanismos subyacentes al desarrollo de la misma son muy debatidos y complejos, ya que pueden suponer la interacción de varios factores, además de que dependen de la modalidad de ejercicio y las diferencias interindividuales [4]. Dependiendo de las circunstancias, la fatiga puede ser el resultado de alteraciones en el sistema nervioso central y/o de factores periféricos dentro de los músculos esqueléticos [5].

En la mayoría de los casos este estado está sujeto a un cúmulo de cambios que experimenta el organismo cuando se encuentra sometido a condiciones extremas de trabajo, o a tipos de trabajo para los cuales no se poseen las respuestas adaptativas necesarias o que sobrepasan los límites particulares de esfuerzo de la persona que realiza dicha actividad. Es un mecanismo de defensa del organismo que busca prevenir la realización de esfuerzos por encima de sus límites, con el fin de impedir la producción de lesiones irreversibles. La fatiga va acompañada de diferentes reacciones del organismo que la identifican, y a partir de las cuales se puede conocer sobre la intensidad, repercusión y pronóstico que caracterizan este proceso [6].

1.2 Clasificación de la fatiga

1.2.1 Tipos de fatiga según el tiempo de aparición

Pueden existir 3 tipos de fatiga, desde el punto de vista del tiempo o momento de aparición del fenómeno:

- **Fatiga aguda**

La aparición de la fatiga aguda ocurre durante y/o después de una sesión intensa de ejercicios, entrenamiento o competición que excede el nivel de tolerancia al esfuerzo de un músculo, produciendo una disminución del rendimiento en función de la cualidad motriz empleada durante el ejercicio: fuerza, velocidad, resistencia o coordinación. Los mecanismos implicados en su producción serán diferentes dependiendo de si es un ejercicio de corta duración, velocidad o fuerza, o si es un ejercicio de larga duración, es decir, con predominancia aeróbica.

Asimismo, este tipo de fatiga puede afectar a un grupo localizado de músculos, por lo que puede decirse que se trata de un problema local. O bien, en aquellos casos en los que afecta a toda la musculatura, es decir, cuando afecta aproximadamente a más de 2/3 de los músculos esqueléticos, como sucede, por ejemplo, en natación, remo, esquí de fondo, y otros deportes en los que intervienen activamente muchos músculos, se le puede denominar global.

Suele estar acompañada de una lesión del tejido muscular, afectando solamente a los músculos involucrados en el ejercicio. Dependiendo de la intensidad, puede manifestarse entre las 8 y 72 horas siguientes, mediante un cuadro de inflamación muscular retardada comúnmente llamado 'agujetas', con un aumento de enzimas musculares en sangre y dolencia muscular. Todo ello debido a microlesiones en el tejido muscular.

- **Fatiga subaguda**

También llamada de sobrecarga, ocurre después de uno o varios microciclos de carga, cuando el esfuerzo se ha producido a una intensidad más elevada a lo adaptado por el sujeto, con relativamente pocas sesiones de regeneración. Es decir, cuando el individuo realiza niveles de entrenamiento ligeramente más altos a los que estaba previamente adaptado. En realidad, este tipo de fatiga es necesaria para estimular la adaptación y la supercompensación del organismo ante un ejercicio físico.

- **Fatiga crónica o síndrome de sobreentrenamiento**

Este tipo de fatiga se origina como resultado de un largo e intenso proceso de entrenamiento, que ocasiona un estado permanente de fatiga que conduce al sobreentrenamiento. Aparece transcurridos varios microciclos, o durante un mesociclo, en los que la relación entre entrenamiento, competición y recuperación se va desequilibrando, dando lugar a un cuadro sistémico de fatiga que siempre conlleva la caída del rendimiento. Tiene consecuencias sistémicas y patológicas de deterioro orgánico global. Se diferencia de la subaguda, más que en el cuadro de síntomas, en la duración y gravedad de los mismos y en el tiempo que va a necesitar el sujeto para recuperarse [7].

1.2.2 Tipos de fatiga según el lugar de aparición

Pueden existir 2 tipos de fatiga, dependiendo del lugar de aparición del fenómeno en el organismo:

- **Fatiga central**

Se entiende por fatiga central o, con mayor precisión, fallo en la activación central, cuando la causa del deterioro de la contracción muscular está por encima de la placa motora, afectando a una o varias de las estructuras nerviosas involucradas en la producción, mantenimiento o control de la contracción muscular [7]. Se caracteriza por la incapacidad del sistema nervioso central de maximizar el reclutamiento de los músculos activos [8].

Las causas y lugares más comunes relacionados con la aparición de la fatiga central son:

- Fallo en la activación neuronal.
- Inhibición aferente desde husos neuromusculares y terminaciones nerviosas.
- Depresiones de la excitabilidad de la motoneurona.
- Alteración en la transmisión del impulso nervioso.
- Fallo presináptico [6].

Los lugares de aparición de la fatiga central corresponden a los distintos elementos del sistema nervioso que participan en la activación de las fibras musculares. Así, el primer lugar que puede afectar a la producción de fuerza es la propia actividad de la motoneurona. Cualquier situación que modifique su actividad está condicionando la actividad eléctrica, la contracción muscular y, por tanto, la producción de fuerza. También la progresión del impulso nervioso generado en la motoneurona que llega a la placa motora podría verse afectada. Y, por último, el fallo en la transmisión del potencial de acción al área postsináptica, involucrando la producción, liberación y recaptación del neurotransmisor.

- **Fatiga periférica**

La fatiga periférica sería aquella en la que los mecanismos que deterioran la contracción muscular afectan a las distintas estructuras contráctiles situadas por debajo de la placa motora. [7] Se debe a cambios en la propia unión neuromuscular o distales a la misma, que conllevan una alteración de las propiedades contráctiles de los músculos activos [8].

Los lugares de aparición de la fatiga periférica son:

- La membrana postsináptica de la placa motora.
- El sarcolema y los túbulos T.
- El acoplamiento entre los túbulos T y el retículo sarcoplasmático o endoplasmático.
- La afinidad del calcio y la troponina.
- Los puentes actina–miosina.
- La recaptación de calcio.

Entre los efectos provocados por la aparición de la fatiga periférica se encuentran:

- La disminución de la fosfocreatina en el músculo, componente energético fundamental de las actividades físicas de alta intensidad y corta duración.
- El aumento de la acidez muscular, como consecuencia de un aumento en la producción de ácido láctico.
- La disminución del glucógeno muscular, combustible fundamental para la realización de actividades físicas de media y larga duración.

La forma de deducir experimentalmente si la fatiga es central o periférica se efectúa mediante la electromiografía (EMG). Si el potencial de acción disminuye y también lo hace la fuerza generada, se puede decir que se trata de fatiga central. Si, por el contrario, el potencial de acción no disminuye y si lo hace la fuerza, la localización de la fatiga es periférica [7].

1.3 La fatiga como factor limitante del rendimiento

El rendimiento deportivo depende de la interacción de factores genéticos, morfológicos, fisiológicos, psicológicos y otros, que se traducen en habilidades y capacidades físicas, técnicas y tácticas, específicas para cada disciplina deportiva. Estas cualidades son potenciadas a través del entrenamiento, desarrollado, principalmente, por las cargas físicas. El entrenamiento es un proceso continuo de estímulos de adaptación, con el objetivo de mejorar las capacidades del organismo, determinantes del rendimiento [1]. El entrenamiento de resistencia estructurado aumenta la resistencia a la fatiga, en parte mediante la alteración del fenotipo del músculo esquelético que realiza el trabajo. A nivel del músculo, un período de entrenamiento de resistencia conduce a mejoras en el flujo sanguíneo y contenido mitocondrial, lo que deriva en una mejor capacidad para extraer y utilizar oxígeno durante el ejercicio. Estos procesos adaptativos son impulsados por cambios transcripcionales en respuesta a cada período de ejercicio. Dichos cambios se acumulan a lo largo del tiempo, de forma que se va modificando el perfil de expresión proteica del músculo, dando como resultado un fenotipo alterado, lo que finalmente resulta en una mayor resistencia a la fatiga [9].

La fatiga consiste en la disminución transitoria y reversible de la capacidad de rendimiento, que garantiza la calidad del proceso de entrenamiento si el trabajo sigue una óptima relación con el descanso [6]. De tal forma que se necesita una adecuada relación trabajo-descanso, así como facilitar los procesos regenerativos del organismo, cuando las exigencias que imponen dichos estímulos exceden las posibilidades individuales de regulación y adaptación del individuo. Si se mantienen durante más de 4 a 6 semanas, surge una respuesta inespecífica, inhibitoria y protectora que frena la adaptación. Esto ocasiona alteraciones importantes a nivel del sistema nervioso, endocrino-metabólico, locomotor, inmunológico, cardiorrespiratorio, y otros, además de una disminución del rendimiento del deportista. El proceso se conoce como síndrome de sobreentrenamiento por acumulación de fatiga crónica.

En los deportes individuales como el ciclismo, natación y triatlón la fatiga es generalmente resultado de altas cargas de entrenamiento, y el manejo de estas cargas durante la monitorización de la fatiga y la recuperación puede ser particularmente importante [10]. La etiopatogenia de la fatiga crónica es atribuible, en la mayoría de los casos, a errores en la planificación y/o dosificación de las cargas, lo cual se amplifica con un sistema competitivo elevado, así como violaciones reiteradas de principios fisiológicos, en particular, los concernientes a la relación temporal carga-recuperación y los procesos regenerativos [1]. Es crítico asegurarse de que la fatiga se ajuste apropiadamente tanto para las adaptaciones al entrenamiento como para el rendimiento en competición [10]. A lo anterior se añaden las exigencias medioambientales, nutrición inadecuada, falta de tiempo libre, tiempo de sueño insuficiente, hábitos tóxicos, estrés por motivos del entrenamiento y de las competiciones, así como problemas de salud, de estudios, económicos, etc. En realidad, este síndrome es, generalmente, fruto de la combinación de varias de las causas mencionadas anteriormente, pero

donde siempre está la relación inadecuada de carga-descanso. Es un fenómeno multifactorial [1].

Los atletas que están entrenándose para actividades tales como carreras de fondo, natación, esquí de fondo o ciclismo a veces experimentan estados de fatiga crónica en la que los días sucesivos a un entrenamiento duro se hacen cada vez más difíciles [11]. Cuando se participa en muchos eventos, donde se exigen resultados decorosos y se dispone de poco tiempo entre uno y otro, surge un medio idóneo para el sobreentrenamiento, cuya recuperación puede tardar varias semanas o meses [1].

1.4 La fatiga en el ciclismo de ruta profesional

El ciclismo es un deporte simétrico que se practica con un elemento mecánico, la bicicleta, que limita la postura del ciclista que va comprendido entre los pedales, en los que encaja mediante unos tacos de los que dispone en las zapatillas, el sillín, sobre el que se sienta, y el manillar, en el que apoya las manos. Una postura adecuada es muy importante a fin de obtener un buen rendimiento deportivo y como profilaxis de lesiones y molestias tales como tendinitis, calambres y contracturas de la musculatura dorso-lumbar y cervical, fundamentalmente.

El ciclismo de ruta, también conocido como ciclismo de carretera, es un deporte de fondo en el que se ponen a prueba distintas cualidades del atleta, como resistencia y velocidad, que conviene que sean ejercitadas durante los periodos de pretemporada y los entrenamientos con bicicleta, adecuando desarrollos (metros de avance por pedalada), kilometraje y tiempo de entrenamiento, a la edad del ciclista y a sus características físicas [12].

El ciclismo de ruta profesional es un deporte de resistencia extrema. Aproximadamente, se recorren de 30000 a 35000 km cada año entre entrenamientos y competiciones, y algunas carreras, como el Tour de France, duran 21 días (aproximadamente 100 horas de competición), durante las cuales los participantes deben hacer más 3500 km. En algunas de las fases de un deporte tan exigente, la intensidad del ejercicio es sorprendentemente alta, ya que los ciclistas profesionales deben completar períodos prolongados de ejercicio (i.e. contrarreloj, ascensos de alta montaña) a altos porcentajes (aproximadamente 90%) del consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}), es decir, por encima del umbral anaeróbico [13]. El ciclismo de ruta profesional, al ser un deporte de alto rendimiento, cuenta con un sistema de competición que exige al ciclista altos resultados, el mantenimiento de éstos y una rápida recuperación, ya que se encuentra sometido muy frecuentemente a reiteradas competiciones y a diferencias marcadas de horarios, climas, etc. [1]. En cada temporada de ciclismo de élite hay de 90 a 100 días de competición, que comprenden carreras de 1 día, carreras de 1 semana y carreras de 3 semanas. La capacidad de mantener un alto rendimiento durante el ciclismo prolongado está limitada por la capacidad del ciclista para resistir la fatiga [2].

En ocasiones, el problema no radica en la cantidad de eventos, sino en las exigencias de las cargas de entrenamiento diario junto a una mala relación descanso por unidad de entrenamiento,



así como una alimentación inadecuada, unido a una sobrecarga psicológica, etc. [1]. No se debe olvidar que en el entrenamiento deportivo la fatiga es un estado imprescindible para poder conseguir respuestas de adaptación, siempre que éstas no conduzcan a estados de sobreentrenamiento [7]. De no existir una adecuada estrategia entrenamiento-competición-recuperación, los deportistas están acumulando fatiga residual y se encuentran a un paso de la fatiga crónica o síndrome de sobreentrenamiento deportivo [1]. No existen procedimientos de tratamiento propiamente dicho de esta condición, si bien, la adopción de medidas protectoras como, por ejemplo, un buen entrenamiento o acondicionamiento físico, u otras estrategias de ayuda ergogénica, pueden retardar su aparición o disminuir su duración [7].

2. Nutrición y fatiga

Desde que los seres humanos comenzaron a participar en competiciones deportivas, la nutrición ha sido considerada como un componente integral de la ejecución [11]. El desarrollo del mercado de alimentos específicos para el deporte y la búsqueda del rendimiento óptimo en las diferentes modalidades de actividad física han favorecido la realización de numerosos estudios sobre la relación entre la nutrición y el soporte metabólico energético, el balance de líquidos y la función muscular [14]. Para el ejercicio de resistencia de duración mayor o igual a 30 minutos, los más probables contribuyentes a la fatiga son la deshidratación y el agotamiento de carbohidratos, mientras que los problemas gastrointestinales, la hipertermia y la hiponatremia pueden reducir el rendimiento del ejercicio de resistencia y son potencialmente peligrosos para la salud, especialmente en las pruebas más largas (de más de 4 horas) [15].

El carbohidrato es el sustrato metabólico cuantitativamente más importante durante el ejercicio prolongado de moderada a alta intensidad, como el ciclismo de ruta, y el glucógeno del músculo esquelético puede disminuir a concentraciones cercanas a cero tras un ejercicio de suficiente duración e intensidad [16]. Durante las competiciones los ciclistas toman bebidas que contienen electrolitos y carbohidratos, con el fin de maximizar la ingesta de líquidos, suplir las pérdidas de electrolitos y proporcionar carbohidratos para obtener energía y reemplazar rápidamente el glucógeno muscular y hepático [17]. El entrenamiento regular de resistencia aumenta la capacidad del músculo esquelético para emplear lípidos como fuente de energía, lo que permitirá al atleta reducir el empleo de hidratos de carbono para una intensidad fija de ejercicio. Esto, a su vez, ahorrará los hidratos endógenos y retrasará la aparición de fatiga.

Sin embargo, aunque los lípidos constituyen un combustible fundamental durante los esfuerzos prolongados, los hidratos de carbono continúan siendo muy importantes, especialmente durante el comienzo de la prueba, aunque cediendo posteriormente el paso de manera lenta pero continuada a los lípidos. Asimismo, también se necesitan hidratos de carbono en las fases en que la provisión de oxígeno no satisface las demandas del metabolismo aeróbico, como puede ocurrir en las carreras de resistencia, que requieren un esfuerzo suplementario a la llegada.

Existe una estrecha relación entre el contenido de glucógeno muscular y la resistencia a la fatiga, tanto durante el ejercicio prolongado como durante el ejercicio intermitente de alta intensidad [18]. A menudo se asocia la fatiga durante el ejercicio prolongado con la depleción del glucógeno muscular y concentraciones reducidas de glucosa en sangre, por lo que se considera que las concentraciones altas de glucógeno muscular y hepático son esenciales para un rendimiento óptimo [15]. Cuando el ejercicio se mantiene durante un tiempo demasiado largo, pueden desarrollarse situaciones de hipoglucemia que contribuyen a la aparición de la fatiga, no por falta de sustratos energéticos para el músculo, que aún dispone del suministro de ácidos grasos libres, sino por la falta de glucosa para el cerebro, que depende casi exclusivamente de ésta para sus necesidades energéticas. En tal situación se presentan una serie de síntomas característicos como sudoración, falta de coordinación, malestar general,

incapacidad para concentrarse y pérdida de energía, que puede llevar al agotamiento e incluso al colapso. La mayor resistencia a la fatiga de los deportistas bien entrenados se debe en parte a su menor sensibilidad a la hipoglucemia y a la mejor adaptación del sistema nervioso a esta situación.

En pruebas deportivas, en especial en las de resistencia, la aparición de fatiga y agotamiento va a depender del depósito de glucógeno muscular y de la velocidad de su metabolismo y depleción. Esto, a su vez, estará relacionado con el nivel de aerobiosis de la prueba y la utilización oxidativa de la grasa, que, como ya se ha dicho previamente, constituye un mecanismo evidente de ahorro del depósito de glucógeno. La importancia del nivel de depósito de glucógeno muscular ha sido la base de diversas manipulaciones alimentarias que intentan no sólo restablecer niveles iniciales cuando aquél se ha deplecionado en pruebas previas, sino incluso aumentarlo en el mayor grado posible.

El estado de sobreentrenamiento o fatiga crónica que pueden experimentar los atletas, del que se ha hablado en apartados anteriores, puede relacionarse con un agotamiento gradual de las reservas corporales de hidratos de carbono, incluso cuando la dieta contiene el porcentaje recomendado de los mismos, lo que ocurre incluso aunque el consumo diario de alimentos contenga de un 40 a un 60% de hidratos de carbono. Una conclusión importante es que, indudablemente, si una persona ejecuta un ejercicio duro en días sucesivos, hay que ajustar las cantidades diarias para permitir una correcta resíntesis de glucógeno y el mantenimiento de un entrenamiento de alta calidad. Además, hacen falta por lo menos 2 días de reposo o de ejercicio más ligero con un alto consumo de hidratos de carbono para restablecer el nivel preejercicio de glucógeno muscular [11].

Además de la depleción de glucógeno, la deshidratación también puede afectar al rendimiento de resistencia. Las pérdidas de sudor se deben a la necesidad de disipar el calor generado durante el ejercicio. Por lo tanto, el desafío nutricional consiste en prevenir la deshidratación grave (más del 2-3% del peso corporal) y por consiguiente contribuir a la prevención de la fatiga [15].

Numerosos investigadores han estudiado aquellas ayudas ergogénicas capaces de mejorar el rendimiento y/o la fatiga a través de la modulación de los aspectos centrales o periféricos de esta última. A pesar de que los suplementos siguen siendo una parte integral de la rutina diaria de los deportistas de élite, ha habido un cambio creciente en las prioridades de muchos atletas, que ahora adoptan un enfoque de "primero los alimentos". En la actualidad, dado el riesgo de contaminación de los suplementos y la posibilidad de fracaso de las pruebas de detección de drogas, normalmente sólo se administran cuando existe una justificación clara para su uso, combinada con la disponibilidad de productos sometidos a pruebas farmacológicas independientes [9].

3. Interés de la revisión

Las ayudas ergogénicas nutricionales son utilizadas en la actualidad como un método para la mejora del rendimiento y/o la fatiga propios de la práctica deportiva [9]. Si un suplemento en particular puede llevar a pequeñas pero determinantes mejoras, podría significar la diferencia entre quedar en primer o segundo lugar, un hecho de especial importancia para los deportistas profesionales [19]. La lista de compuestos supuestamente ergogénicos es muy amplia, pero el número de sustancias con propiedades verdaderamente ergogénicas es mucho más reducido. No todas las sustancias potencialmente ergogénicas son realmente útiles ni beneficiosas y, en ocasiones, presentan efectos negativos sobre el rendimiento o sobre la salud [11]. Es importante que las decisiones respecto a su consumo se tomen teniendo en cuenta la información sólida que sugiere que el uso de un determinado compuesto es seguro, legal y eficaz [20].

Aunque es cierto que en algunas ocasiones se han realizado estudios rigurosos acerca de la utilidad de compuestos potencialmente ergogénicos, también lo es que la mayoría de las declaraciones sobre los posibles efectos en el rendimiento deportivo o la salud que aparecen en las etiquetas de muchos productos no están respaldadas por pruebas científicas claras [21]. Afortunadamente, el número de estudios objetivos y racionalmente diseñados, realizados por especialistas en los campos de la nutrición deportiva y la fisiología del ejercicio, es cada vez mayor [11]. Gracias a ello, instituciones como el AIS han creado un sistema para clasificar los suplementos según sus efectos sobre el rendimiento basados en pruebas científicas confirmadas. Por lo tanto, los compuestos asignados a la clase A han demostrado con un alto nivel de evidencia mejorar el rendimiento del ejercicio en ciertas modalidades cuando se toman en las cantidades apropiadas [21].

Por lo tanto, el interés de la realización de este trabajo radica en analizar los posibles efectos beneficiosos y la utilidad de los compuestos nutricionales ergogénicos pertenecientes a la clase A de la clasificación del AIS respecto a la disminución de la fatiga, y la consecuente optimización del rendimiento, producida durante la práctica del ciclismo de ruta profesional. Dichas sustancias son la creatina, el zumo de remolacha, la β -alanina, el bicarbonato de sodio, la cafeína y las bebidas y/o geles de carbohidratos.

3.1 Creatina

La creatina (Cr) es un compuesto que se encuentra en alimentos de origen animal, especialmente en carne y pescado, pero que también puede ser sintetizado en el organismo a partir de los aminoácidos glicina, arginina y metionina [22]. Ha demostrado ser una ayuda ergogénica nutricional segura y efectiva para la mejora del rendimiento en el ejercicio de alta intensidad [23]. El 95% de la Cr de nuestro cuerpo se ubica en el músculo esquelético. La fosfocreatina (PCr), su forma fosforilada, supone un 65% de la Cr intracelular [22], siendo un

sustrato clave para la generación de fuerza muscular de alta intensidad. Se ha demostrado que el contenido de PCr disminuye durante ejercicios prolongados al 70% de VO_{2max} [24], como el ciclismo de ruta profesional. Cuando se ingiere de acuerdo a protocolos de carga y/o mantenimiento establecidos, la suplementación con Cr puede aumentar las reservas de Cr intramuscular, lo cual permite una mayor tasa de resíntesis de PCr [25], aumentando la producción de potencia y retrasando la aparición de fatiga [26]. Esto se traduciría en una mejora tanto del rendimiento durante los sprints repetidos de alta intensidad propios de las últimas etapas de una competición [25], como de las adaptaciones al entrenamiento. El monohidrato de creatina (CM) es la forma de Cr más comúnmente utilizada como suplemento, aunque se ha ido introduciendo en el mercado en distintas formas. También se ha demostrado que la ingestión de Cr junto con otros nutrientes, como los CHO, podría proporcionar beneficios sinérgicos y/o aditivos [23], además de que la liberación de insulina estimula la absorción de Cr por el músculo esquelético [27].

3.2 Zumo de remolacha

El zumo de remolacha se ha convertido en una adición reciente al arsenal de suplementos deportivos basados en la evidencia, con preparaciones comerciales que proporcionan una fuente segura, rentable y fiable de nitrato inorgánico (NO_3^-) [9]. Se ha visto que la administración de suplementos de NO_3^- mejora la eficiencia muscular, la resistencia a la fatiga y el rendimiento en el ejercicio [28]. Dichos efectos podrían deberse a que la ingesta de NO_3^- conduce a una biodisponibilidad mejorada de óxido nítrico (NO) a través de la vía NO_3^- -nitrito (NO_2^-)-NO [20]. El NO cumple con múltiples funciones relacionadas con el aumento del flujo sanguíneo, el intercambio de gases, la biogénesis y eficiencia mitocondrial, y el fortalecimiento de la contracción muscular. Por tanto, la suplementación con zumo de remolacha puede tener un efecto ergogénico en deportistas, especialmente respecto a la resistencia cardiorrespiratoria [29]. Aunque la mayoría de los efectos del zumo de remolacha son atribuidos a su alto contenido en NO_3^- , también contiene compuestos fitoquímicos, entre los que destacan las betalainas. Se ha demostrado que éstas, dotadas de propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, podrían reducir el daño relacionado con el ejercicio a las células musculares y proporcionar efectos beneficiosos sobre el rendimiento [30].

3.3 β -alanina

La β -alanina (β -ALA) es un aminoácido no esencial capaz sintetizarse en el hígado y de obtenerse a través la dieta, especialmente mediante el consumo de carnes y pescados [31]. Se ha demostrado que su uso como suplemento permite amortiguar los factores de inducción de la fatiga extracelular e intracelular [32]. Es en el músculo esquelético donde la β -ALA desempeña su papel fundamental, como factor intermediario y limitante de la síntesis de carnosina. La carnosina es un dipéptido responsable de reducir la fatiga y amortiguar la acidosis muscular

[31], ya que funciona como tampón intracelular endógeno y como una de las defensas inmediatas contra la acumulación de iones de hidrógeno (H^+) en la musculatura contraída durante el ejercicio [20]. El hecho de que la concentración de β -ALA en el músculo esquelético sea menor que la concentración de histidina, el otro aminoácido del que se compone la carnosina, la convierte en un precursor limitante de la síntesis endógena de carnosina en dicho tejido. Además, la actividad de la carnosina sintetasa no se ve afectada por el aumento en la concentración de histidina, mientras que si es sensible al de β -ALA. De ahí que la suplementación con β -ALA pueda aumentar significativamente el contenido de carnosina en el músculo y, con ello, el control de la acidosis inducida por el ejercicio, aumentando la tolerancia al mismo [33]. Sin embargo, existe una gran variabilidad interindividual, dependiendo de la absorción de cada individuo, de su peso, o de su masa magra, aumentando la retención cuanto mayor sea su masa muscular. Sólo un 2,5% de la β -ALA consumida contribuye a la producción de carnosina, y un 1-2% se elimina a través de la orina, por lo que no se sabe qué ocurre con aproximadamente el 95% de la β -ALA restante [22]. Por este motivo se recomienda un abordaje individualizado de la suplementación con β -ALA siempre que sea posible [20].

3.4 Bicarbonato de sodio

El ciclismo de ruta profesional consta de ciertas fases de alta intensidad, en las que los ciclistas deben completar periodos de ejercicio prolongados (i.e. contrarreloj, ascensos de alta montaña) [13] que requieren altas tasas de producción de energía a partir de la glucólisis anaeróbica [9]. Como consecuencia de dicha demanda, se produce una acumulación exponencial de metabolitos en el músculo, entre los que se incluyen los H^+ . Debido a la relación inversa entre los H^+ y el pH, este proceso causa acidosis metabólica, traduciéndose en una disminución del pH sanguíneo y muscular. Aunque no existe un único mecanismo responsable de la fatiga periférica, en su desarrollo han sido implicadas perturbaciones en el equilibrio ácido-base como ésta [34]. Es ampliamente reconocido que el tampón extracelular más efectivo es el bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) [35]. El uso de $NaHCO_3$ como suplemento ha demostrado amortiguar los factores de inducción de la fatiga extracelular e intracelular [32]. La ingestión aguda de $NaHCO_3$, si logra un aumento significativo, aunque temporal, de las concentraciones de bicarbonato (HCO_3^-) en sangre, favorece el flujo de salida de H^+ del músculo activo [9], contribuyendo así al equilibrio ácido-base muscular durante el ejercicio [35]. De esta forma se mitigan los efectos de la acidosis metabólica [36], lo que se traduce en una reducción de la fatiga [37] y una mejora del rendimiento y la capacidad de ejercicio [35]. De ahí su interés como ayuda ergogénica en el campo de la nutrición deportiva.

3.5 Cafeína

Desde la década de 1970, la cafeína (CAF), 1,3,7-trimetilxantina, un compuesto naturalmente presente en alimentos vegetales como café, té, cacao o guaraná [22], ha sido una popular ayuda

ergogénica para deportes de resistencia [38]. Es probablemente la sustancia más investigada en cuanto a su efecto sobre el rendimiento físico, debido a que se le atribuyen múltiples mecanismos de acción que lo favorecen [22]. Aunque no se ha demostrado el mecanismo principal de su efecto ergogénico, su estructura es similar a la adenosina, un inhibidor del sistema nervioso central (SNC), lo que ayuda a perpetuar la idea de que su acción primordial es la inhibición de la adenosina en el SNC, dando lugar a una percepción reducida del esfuerzo, fatiga o dolor asociados al ejercicio. Otra teoría plausible es el ahorro de glucógeno al inicio del ejercicio debido al incremento de la concentración de ácidos grasos libres en sangre [38], ya que la CAF también antagoniza los receptores de adenosina en el tejido adiposo, provocando un aumento de la lipólisis [22]. Los efectos de la ingesta de CAF en la mejora del rendimiento aeróbico están bien establecidos, y existe evidencia considerable de que también podría afectar positivamente al rendimiento anaeróbico [39], siendo ambos relevantes en el ciclismo de ruta profesional. La confirmación del papel ejercido por la genética y otras fuentes de variabilidad individual en el metabolismo de la CAF, proporciona respaldo al hecho de que algunos deportistas respondan poco o nada a la CAF y/o sufran efectos secundarios [9].

3.6 Bebidas y/o geles de carbohidratos

La aparición de fatiga a lo largo del ejercicio está fuertemente asociada al agotamiento de las reservas endógenas de hidratos de carbono (CHO). La necesidad de reemplazo de CHO aumenta a medida que el entrenamiento y la competición se extienden más allá de los 70 minutos [40], como ocurre en el ciclismo de ruta profesional. Se ha demostrado que la ingesta de CHO durante los mismos, en forma de bebidas o geles, permite mejorar el rendimiento y retrasar la fatiga. Esto es de especial importancia cuando se busca un rendimiento óptimo en más de una ocasión con un intervalo limitado de tiempo entre ellas, como ocurre en periodos de entrenamiento intensivo o carreras por etapas (i.e. Tour de France) [41]. Para obtener dichos beneficios, los deportistas deben cubrir sus objetivos individualizados de CHO exógenos, determinados en función de la duración del ejercicio. Normalmente se prefiere la combinación de los formatos semisólidos (i.e. geles) y líquidos (i.e. bebidas) frente a los sólidos (i.e. barritas), ya que éstos últimos suelen ocasionar molestias gastrointestinales por la común presencia de fibra, grasa y proteína en las barritas [9]. Los CHO empleados habitualmente consisten en una mezcla de glucosa y fructosa, debido a su mayor velocidad de digestión y absorción en comparación con la ingesta de glucosa por sí sola, lo que permite su uso inmediato como combustible y disminuye la probabilidad de malestar gastrointestinal [41]. También se especula acerca de la suplementación con CHO en combinación con proteína para potenciar su efecto ergogénico, además de promover la reposición de glucógeno y el balance positivo de nitrógeno, y minimizar el daño muscular [40].

4. Objetivos del trabajo

Los objetivos a conseguir con el desarrollo del presente trabajo son los siguientes:

- Objetivo general:
 - Realizar una revisión bibliográfica sobre la evidencia científica disponible acerca del papel que pueden desempeñar los distintos compuestos y/o sustancias nutricionales empleados hoy en día para la mejora del rendimiento en el ciclismo de ruta profesional concretamente, orientando a la disminución de la fatiga producida durante su práctica.
- Objetivos específicos:
 - Recopilar información sobre los diferentes compuestos nutricionales existentes, cuyo efecto ergogénico ha sido demostrado con un alto nivel de evidencia, y comprobar su aplicación respecto a la fatiga en el ciclismo de ruta profesional.
 - Analizar las posibles diferencias entre las acciones ergogénicas propias de los distintos compuestos.
 - Analizar las posibles diferencias entre las acciones ergogénicas según las características de los estudios realizados.
 - Traducir los resultados obtenidos respecto a cada compuesto ergogénico en su aplicación al ciclismo de ruta profesional.

5. Material y métodos

5.1 *Criterios de selección de artículos*

Los principales artículos empleados en este trabajo, son estudios originales que evalúan el efecto de distintas sustancias ergogénicas nutricionales sobre diversos aspectos relacionados el rendimiento. Tales como la fatiga, la respuesta hormonal, la tolerancia al ejercicio, el metabolismo de sustratos, el gasto energético, entre otros.

Únicamente se escogieron ensayos controlados aleatorizados en inglés. Los cuales se centraron en el efecto de los compuestos ergogénicos en el rendimiento del deportista, y se basaron en una medición estandarizada de los parámetros relacionados con el mismo. Una serie ensayos seleccionados cumplieron estos objetivos, estableciéndose los demás criterios de elegibilidad de dichos artículos:

- Solamente se han seleccionado ensayos controlados aleatorizados.
- Los ensayos se limitan a sujetos adultos.
- Únicamente se tenido en cuenta aquellos ensayos realizados en el periodo de tiempo comprendido entre los años 2000 y 2018.
- El objetivo global de todos los artículos es evaluar la manera en la que influye la ingesta de una determinada sustancia ergogénica sobre la capacidad de ejercicio del ciclista. Así como su influencia sobre determinados aspectos relacionados con el rendimiento físico y la aparición de la fatiga.

Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión mencionados, se ha recopilado un total de 54 estudios para los 6 compuestos a analizar, que cumplen con todos ellos.

5.2 *Estrategia de búsqueda*

Para ser capaz de encontrar información con un alto grado de validez, se estableció una estrategia de búsqueda. Con el objetivo de que los artículos cumplieran los criterios de elegibilidad anteriores, las siguientes bases de datos electrónicas fueron revisadas. MEDLINE (análisis de la literatura médica y sistema de recuperación online), donde en la página web PubMed (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>) se hallan más de 24 millones de citas de la literatura biomédica de MEDLINE. La base de datos ResearchGate (<https://www.researchgate.net>), una red social académica para científicos e investigadores de cualquier rama de la ciencia, en la que se pueden encontrar publicaciones de alta calidad basadas en la evidencia. Así como la plataforma Scribd (<https://www.scribd.com>), en la que se almacenan y comparten multitud de documentos.

Los términos utilizados para buscar los ensayos elegidos son: creatina y ciclismo, creatina y ciclismo profesional, creatina y ciclistas, creatina y resistencia, creatina y deporte, creatina y fatiga, creatina y ergogénico, creatina y ejercicio, creatina y deportista. Al igual que con la creatina, se hicieron las mismas combinaciones de términos con el resto de las sustancias ergogénicas descritas previamente.

También se realizaron búsquedas a partir de la bibliografía de los artículos seleccionados, con el fin de encontrar información útil para el desarrollo del trabajo.

En la figura 1 y la tabla 8 se expone el resumen de lo mencionado previamente.

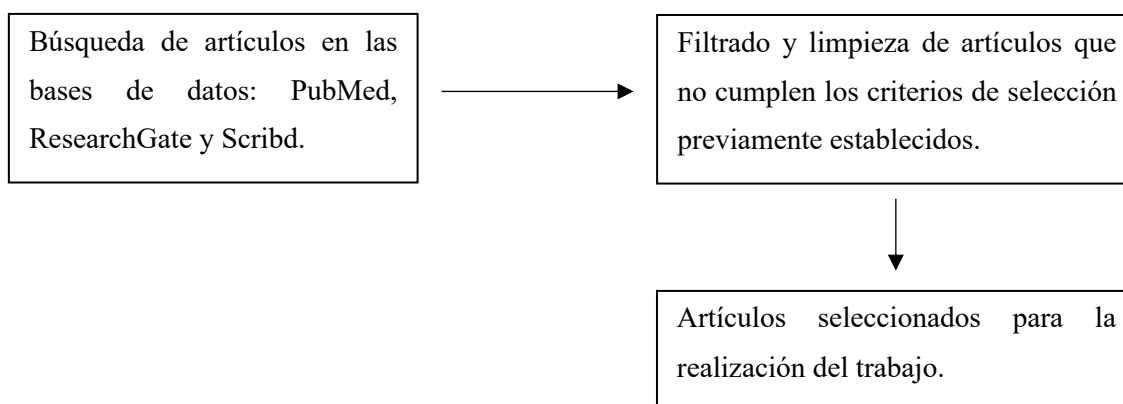


Figura 1. Resumen selección de artículos.

Base de datos utilizadas	<ul style="list-style-type: none"> • MEDLINE (PubMed) • ResearchGate • Scribd 	
Términos de búsqueda	<ul style="list-style-type: none"> • Compuesto 'x' y ciclismo • Compuesto 'x' y ciclismo profesional • Compuesto 'x' y ciclistas • Compuesto 'x' y deporte • Compuesto 'x' y deportista 	<ul style="list-style-type: none"> • Compuesto 'x' y fatiga • Compuesto 'x' y rendimiento • Compuesto 'x' y resistencia • Compuesto 'x' y ergogénico • Compuesto 'x' y ejercicio
Periodo de artículos	Comprendidos entre los años 2000 y 2018.	
Tipos de artículos	Ensayos controlados aleatorizados.	

Tabla 8. Resumen estrategia de búsqueda.

6. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados de los diferentes estudios analizados, al igual que la discusión de los mismos, con la intención de obtener conclusiones acerca del efecto ergogénico de los compuestos nutricionales anteriormente mencionados, considerados de alto nivel de evidencia respecto a dicho efecto, sobre la fatiga en el ciclismo de ruta profesional, y/u otros parámetros relacionados con la misma.

6.1 Creatina

Autor	Tipo de estudio	Sujetos	Intervención	Cantidad de sustancia	Efectos valorados
Crisafulli et al. 2018 [26]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	23 ciclistas recreativos masculinos	Suplementación con CM combinado con electrolitos durante 6 semanas	4 g/día	Sprints repetidos de 15 s: ↑ masa corporal (MC), ↑ potencia máxima global (4%) y repetida, ↑ potencia media global (5%) y repetida
Tomcik et al. 2018 [42]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	18 ciclistas masculinos entrenados en resistencia	Protocolo de carga de Cr de 9 días	20 g/día los días 1-5 3 g/día los días 6-9	Contrarreloj de 120 km intercalada con sprints de 1 y 4 km cada 10 km: ↑ MC, ↑ potencia generada en sprint final de 4km, ↑ percepción subjetiva de esfuerzo (RPE), no efectos significativos sobre tiempo de finalización, glucógeno muscular
De Andrade	Aleatorizado, doble ciego,	19 ciclistas recreativos	Protocolo de carga de Cr	20 g/día	Contrarreloj de 1 km: ↑ MC y masa

Nemezio et al. 2015 [43]	controlado con placebo	masculinos	(usando CM) de 5 días		libre de grasa (MLG), ↓ tiempo medio de respuesta del consumo de oxígeno (VO_2), VO_2 y contribución aeróbica, ↑ contribución anaeróbica y déficit de O_2 , no efecto significativo sobre potencia, tiempo de finalización y lactato sanguíneo
Hickner et al. 2010 [24]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	12 ciclistas masculinos entrenados en resistencia	Suplementación con CM durante 4 semanas	3 g/día	2 h de ciclismo al 60% del VO_{max} intercaladas con sprints de 10 s al 110% del VO_{max} cada 15 min: ↑ MC, ↑ Cr y PCr musculares en reposo; ↑ volumen plasmático y glucógeno muscular, y ↓ VO_2 submáximo al final de la prueba; no efectos significativos sobre tiempo de finalización, tasa de intercambio respiratorio, glucosa y lactato sanguíneos, y potencia

Ahmun et al. 2005 [44]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	14 jugadores de rugby altamente entrenados	Protocolo de carga de Cr (usando CM) de 5 días	20 g/día	Test anaeróbico de Wingate (WanT): no efectos significativos sobre MC, potencia y fatiga
Havenetidis et al. 2003 [45]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	28 hombres físicamente activos	Distintos protocolos de carga de Cr (usando CM) de 4 días	Protocolo 1 (P1): 10 g/día Protocolo 2 (P2): 25 g/día Protocolo 3 (P3): 35 g/día	WanT: ↑ MC y Cr sanguínea y urinaria, ↑ medio de 11,8% (P2) y 11,1% (P3) de potencia media generada
Finn et al. 2001 [46]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	16 triatletas masculinos	Protocolo de carga de Cr (usando CM) de 5 días	20 g/día	Sprints máximos de 20 s: ↑ MC, MLG y Cr muscular, no efectos significativos sobre PCr muscular, actividad de citrato sintasa, lactato sanguíneo, potencia y fatiga
Deutekom et al. 2000 [47]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	Remeros bien entrenados	Protocolo de carga de Cr (usando CM) de 6 días	20 g/día	Electroestimulación del cuádriceps y WanT: ↑ MC, no efectos significativos sobre activación muscular, fatiga, potencia y tasa de recuperación

La suplementación con Cr puede proporcionar un efecto ergogénico en sprints repetidos de alta intensidad, siempre y cuando estén intercalados con periodos de recuperación adecuados.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los estudios Tomcik et al. 2018 [42] y Havenetidis et al. 2003 [45], un protocolo de carga de Cr de 20 g al día durante 5 días o 25 g al día durante 4 días, sería suficiente para, en lo concerniente al ciclismo de ruta profesional, aumentar el rendimiento durante los sprints repetidos de alta intensidad propios de las últimas etapas de una competición. De la misma forma que ocurre en el ensayo de Crisafulli et al. 2018 [26], aunque en éste la suplementación se realizó durante un periodo de tiempo más largo (6 semanas) y en una dosis más reducida (4 g/día). Dicho incremento del rendimiento se manifiesta en todos ellos mediante el aumento de la potencia generada por los sujetos durante los sprints. Las disminuciones en el VO_2 y la contribución aeróbica, acompañadas del aumento de la contribución anaeróbica, observadas en algunos de los ensayos ([43], [24]), evidencian la relación de la Cr con la vía anaeróbica aláctica, de ahí que la mayoría de los estudios analizados se centren en valorar su eficacia en sprints [22].

El efecto ergogénico observado podría atribuirse principalmente a una mayor rapidez en la síntesis de PCr y, por tanto, de ATP, entre cada sprint. Sin embargo, esta resíntesis comienza a producirse tras 60-120 segundos de recuperación [22]. Esta sería un posible explicación de por qué los estudios en los que el tiempo de recuperación entre sprints fue inferior a 30 segundos, impidiéndose la suficiente síntesis de PCr, no encontraron resultados positivos, como Ahmun et al. 2005 [44] y Finn et al. 2001 [46]. Tampoco se contempló dicho efecto en aquellos estudios en la que la suplementación se evaluó en pruebas que no consistían en sprints repetidos, como los sprints aislados de Hickner et al. 2010 [24] o la contrarreloj de De Andrade Nemezio et al. 2015 [43], lo que parece indicar que la Cr también tiene alguna influencia en el desarrollo de la fatiga [22].

También se ha especulado que el aumento en la producción de potencia podría deberse a una disminución de la utilización de glucógeno muscular y la degradación de proteínas musculares. De ahí que en Hickner et al. 2010 [24] se haya observado un incremento significativo del glucógeno muscular. Asimismo, una menor concentración de lactato sanguíneo indicaría una disminución de la glucogenólisis muscular [42], apoyando la hipótesis. Sin embargo, el resto de los estudios en los que se han analizado el glucógeno muscular y el lactato sanguíneo, carecen de resultados significativos respecto a los mismos.

Otro efecto observado, prácticamente en la totalidad de los estudios analizados ([26], [42], [43], [24], [45], [46], [47]), es que la suplementación con Cr aumenta la masa corporal, probablemente a causa del mayor contenido de Cr intramuscular total, lo cual se asocia con un aumento de la masa magra o masa libre de grasa, visto en los resultados de De Andrade Nemezio et al. 2015 [43], y/o mayor retención de agua intracelular [26]. Esto mejoraría la fuerza muscular y la potencia, pudiendo ayudar a los ciclistas profesionales a soportar una mayor carga de entrenamientos, mejorando el rendimiento físico en la competición [22]. Cabe destacar que el incremento de peso de los sujetos previo al ejercicio, en todos los ensayos en los

que se observa, no afectó a ninguna de las variables del ejercicio sensibles al peso. Este último hallazgo es de importancia práctica, ya que muchos ciclistas suelen ser reacios al uso de Cr como suplemento, debido al temor que les produce el hecho de que la ganancia de peso asociada al mismo limite su rendimiento [42], al ser el ciclismo de ruta un deporte en el que se le da especial relevancia al peso.

Havenetidis et al. 2003 [45], el único estudio analizado en el que se comparan distintos protocolos de carga de Cr, mostró que una dosis de 10 g al día durante 4 días resulta insuficiente para obtener efectos significativos sobre el rendimiento, mientras que una dosis de 35 g al día durante el mismo periodo de tiempo no produce mayores beneficios que una de 25 g. Se piensa que suplementación con 10 g podría no haber elevado la concentración de Cr sanguínea lo necesario para facilitar su entrada al músculo, disminuyendo su captación por el mismo y resultando en un incremento de Cr muscular insuficiente para producir un efecto ergogénico. Por otra parte, respecto a la dosis de 35 g, existe la posibilidad de que el aumento de los niveles de Cr producido por la misma no necesariamente condujera a una entrada de Cr muscular más eficiente y, en consecuencia, a una mayor potenciación del rendimiento, sino a una mayor excreción de Cr, ya que las mayores concentraciones de Cr sanguínea estuvieron acompañadas de una mayor excreción urinaria de Cr durante 24 horas [45]. Por lo tanto, la dosis de 25 g de Cr al día sería suficiente para obtener su efecto ergogénico.

Se desconoce el motivo concreto de la aparente contradicción de algunos de los resultados de Ahmun et al. 2005 [44] y Deutekom et al. 2000 [47] con los del resto de estudios analizados, pero es probable que sea debida a aspectos relacionados con las diferencias interindividuales de los sujetos, la homogeneidad de los mismos y/o el protocolo de ejercicios utilizado. Además, la respuesta a la suplementación con Cr depende de los niveles preexistentes de Cr muscular, pudiendo no haberse tenido en cuenta en estos estudios, y aproximadamente el 20% de los individuos no responden a la misma [31], lo cual es otra de las posibles causas.

6.2 Zumo de remolacha

Autor	Tipo de estudio	Sujetos	Intervención	Cantidad de sustancia	Efectos valorados
McQuillan et al. 2017 [32]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	9 ciclistas masculinos altamente entrenados	Suplementación con zumo de remolacha durante 7 días	140 ml/día	Contrarreloj de 1 y 4 km: no efectos significativos sobre NO ₂ -plasmático y

					potencia media generada
Rimer et al. 2016 [48]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	13 atletas (11 hombres y 2 mujeres) de competición	Suplementación aguda con zumo de remolacha	2 dosis de 70 ml separadas por 30 min (140 ml/día) 2 h antes del ejercicio	Prueba con carga inercial de 3 s y prueba isocinética de 30 s: ↑ potencia máxima generada, ↑ cadencia óptima de pedaleo en sprints, no efectos significativos en WanT
MacLeod et al. 2015 [49]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	11 ciclistas masculinos entrenados	Suplementación aguda con zumo de remolacha	70 ml 2 h antes del ejercicio	Prueba de 15 min al 50% del VO_{max} y contrarreloj de 10 km en normoxia e hipoxia moderada: ↑ NO_3^- plasmático, ↑ NO exhalado, no efectos significativos sobre VO_2 , potencia y tiempo de finalización
Hoon et al. 2014 [50]	Aleatorizado, controlado con placebo, crossover	26 ciclistas masculinos entrenados	Distintos protocolos de suplementación aguda con	- P1: 70 ml 2,5 h antes de la 1ª prueba	2 contrarreloj de 4 min separadas por 75 min: $[NO_2^-]$

			zum de remolacha	- P2: 70 ml 75 min antes de la 1º prueba - P3: 70 ml 2,5 h antes de la 1º prueba más 35 ml justo al acabarla	plasmática máxima en P2, no efectos significativos sobre potencia
Muggeridge et al. 2014 [51]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	9 ciclistas masculinos recreativos de competición	Suplementación aguda con zum de remolacha	70 ml 3 h antes del ejercicio	15 min de ciclismo submáximo al 60% de la potencia máxima seguidos de contrarreloj de 16,1 km en hipoxia moderada: ↑ NO ₃ ⁻ y NO ₂ ⁻ plasmáticos, ↓ VO ₂ , ↓ tiempo de finalización
Wilkerson et al. 2012 [52]	Aleatorizado, simple ciego, controlado con placebo, crossover	8 ciclistas masculinos bien entrenados	Suplementación aguda con zum de remolacha	500 ml 2,5 h antes del ejercicio	Contrarreloj de 50 millas (≈ 80 km): ↑ NO ₂ ⁻ plasmático, ↓ VO ₂ , ↑ potencia máxima generada, no efecto significativo sobre tiempo de finalización

Cermak et al. 2012 [53]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	10 ciclistas masculinos de competición	Suplementación con zumo de remolacha durante 6 días	140 ml/día	60 min de ciclismo submáximo seguidos de contrarreloj de 10 km: ↑ rendimiento, ↑ potencia media generada, ↓ VO ₂ submáximo
Lansley et al. 2011 [54]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	9 ciclistas masculinos de competición	Suplementación aguda con zumo de remolacha	500 ml 2,5 h antes del ejercicio	Contrarreloj de 4 y 16,1 km: ↑ NO ₂ -plasmático, ↑ potencia media generada, ↑ rendimiento (2,8% en 4 km y 2,7% en 16,1 km), no efectos significativos sobre VO ₂

La suplementación con zumo de remolacha ya sea aguda o crónica, podría tener un efecto ergogénico durante el ciclismo de ruta profesional, incluso en condiciones de hipoxia.

Los efectos ergogénicos de la suplementación con zumo de remolacha son debidos a su alto contenido en NO₃⁻, más concretamente a los distintos mecanismos fisiológicos que se ponen en marcha en el organismo a causa de una mayor disponibilidad de NO, producido a partir del NO₃⁻ mediante la vía metabólica NO₃⁻-NO₂-NO, como ya se explicó en la introducción. De ahí que todos los estudios en los que fueron medidas las concentraciones sanguíneas de dichos sustratos encontraran aumentos significativos de las mismas ([49], [51], [55], [52], [54]). Muchos de los efectos sobre el rendimiento observados en los resultados recopilados pueden ser explicados mediante los mecanismos mencionados.

Varios estudios han demostrado un efecto positivo de la ingesta aguda de zumo de remolacha en diferentes parámetros de mejora del rendimiento asociados con el sistema cardiovascular y

respiratorio. La economía es un parámetro que expresa la relación entre el VO_2 y la potencia generada o la distancia recorrida por un atleta, considerado como un factor de rendimiento en la resistencia cardiorrespiratoria. La mejora en la economía se debe a la obtención de una mayor potencia con el mismo nivel de VO_2 , como se muestra en el estudio de Lansley et al. 2011 [54]. Otra mejora atribuida a la suplementación con zumo de remolacha está relacionada con el aumento del flujo sanguíneo, favoreciendo el suministro de oxígeno a las mitocondrias, cuyo efecto secundario es la estimulación del metabolismo oxidativo. También es capaz de mejorar los procesos de contracción y relajación muscular [29]. Dichos efectos explicarían el por qué de la disminución del VO_2 vista en algunos de los resultados recopilados ([51], [52], [53]). En el estudio realizado por Wilkerson et al. 2012, en el que se utilizó un protocolo de suplementación aguda con zumo de remolacha, la reducción del VO_2 vino acompañada de un aumento significativo de la potencia generada por los ciclistas durante una prueba de 50 millas, aunque la reducción en el tiempo de finalización de ésta fue sólo de un 0,8%, por lo que no se consideró que la suplementación produjera un aumento significativo del rendimiento [52].

También se ha visto que suplementación con zumo de remolacha puede mejorar la eficiencia de la respiración mitocondrial y la fosforilación oxidativa. Sin embargo, parece que la suplementación aguda es insuficiente para producir biogénesis mitocondrial, lo que sugiere que estas adaptaciones pueden requerir protocolos de suplementación más prolongados [29]. Por este motivo se recopilaron los datos de los estudios realizados por Cermak et al. 2012 y McQuillan et al. 2017. El primero [53] confirmó que la suplementación durante un período de 6 días reduce el VO_2 en una prueba de 60 minutos. El protocolo consistió en 30 min a 45% del $\text{VO}_{2\text{max}}$ seguido de otros 30 min a 65% del $\text{VO}_{2\text{max}}$. Además, los ciclistas mejoraron su rendimiento durante los 10 km de contrarreloj inmediatamente después de la prueba submáxima. No ocurrió lo mismo en el otro estudio [32], en el cual, a pesar de seguir un protocolo de suplementación casi idéntico al del anterior, los ciclistas no obtuvieron ningún efecto positivo sobre el rendimiento. Estas diferencias podrían deberse a las posibles limitaciones de este último [32].

Numerosas competiciones de ciclismo de ruta profesional incluyen etapas de montaña que acontecen a grandes alturas, donde la resistencia cardiorrespiratoria disminuye en relación con el nivel del mar. Entre los factores que podrían ser responsables de esta disminución, destacamos el descenso del suministro de oxígeno a los músculos, debido a una reducción parcial de la presión de oxígeno. Se sabe que el NO tiene un papel importante en los procesos de adaptación en condiciones hipóxicas. Los efectos vasodilatadores del NO pueden favorecer el suministro de oxígeno [29], y la suplementación con zumo de remolacha podría ser eficaz para reducir los efectos ergolíticos de la hipoxia sobre la resistencia cardiorrespiratoria [51]. En el estudio de Muggeridge et al. 2014, el cual simuló una altitud de 2500 m, la suplementación

redujo el VO_2 durante una prueba de 15 minutos al 60% del VO_{2max} , además de aumentar la velocidad alcanzada en una prueba contrarreloj de 16,1 km en ciclistas entrenados [51]. Por lo tanto, es posible que la suplementación con zumo de remolacha pueda mejorar efectivamente el rendimiento del ciclismo de ruta profesional cuando hay hipoxia, a causa de una mejora en la oxigenación a nivel muscular, reduciendo los efectos ergolíticos de la hipoxia en el rendimiento aeróbico [29]. Sin embargo, MacLeod et al. 2015 evaluó los efectos de la suplementación aguda con zumo de remolacha en una prueba de 15 min a una intensidad del 50% del VO_{max} y una contrarreloj de 10 km a una altitud simulada de 2500 m, sin poder verificar ningún beneficio en ninguna de las variables de rendimiento analizadas [49].

Hoon et al. 2014 es el único estudio de los analizados en evaluar el efecto ergogénico de distintos protocolos de suplementación aguda con zumo de remolacha. Uno de ellos proporcionó una dosis de 70 ml 2 horas y media antes de la primera sesión de ciclismo (contrarreloj de 4 minutos), otro lo retrasó hasta 2 horas y media antes de la segunda contrarreloj, mientras que el tercer protocolo involucró una dosis completa antes de la primera prueba de tiempo, con media dosis de "recarga" inmediatamente después de su finalización. Una limitación de este estudio, reconocida al compararlo con otros más recientes, es que las dosis utilizadas se considerarían actualmente demasiado bajas para lograr efectos claros y óptimos, especialmente en ciclistas de alto calibre. Sin embargo, se observa que, en comparación con el ensayo con placebo, todos los ensayos con zumo de remolacha parecieron proporcionar una pequeña mejora del primer ensayo temporal, pero un posible efecto negativo en el segundo episodio, tal vez debido a la fatiga residual de las demandas adicionales del esfuerzo inicial. De todas formas, ninguna de las observaciones fue significativa. Por lo tanto, se requiere más trabajo sobre el uso repetido del zumo de remolacha y su potencial efecto postpuesto en episodios de ejercicio repetidos [50].

Por último, en el estudio realizado por Rimer et al. 2016 se evaluaron los efectos de la suplementación aguda con zumo de remolacha sobre el rendimiento durante una prueba de intensidad máxima de 3 segundos en un cicloergómetro isoinercial y otra de 30 segundos en un cicloergómetro isocinético. La suplementación fue efectiva para mejorar la cadencia óptima de pedaleo y la potencia generada en la prueba de carga inercial, mientras que en la isocinética no se observó tal efecto. La diferencia entre los ergómetros utilizados en las dos pruebas es que, mientras que en la prueba isocinética la cadencia del pedaleo es prefijada y las mejoras sólo son posibles en la fuerza, en una prueba isoinercial la carga de trabajo es fija y las mejoras de potencia producidas se manifiestan como mejoras en la cadencia de pedaleo [48]. Dado que la suplementación con jugo de remolacha podría mejorar la generación de potencia como consecuencia de una reducción de la velocidad de acortamiento muscular [21], el cicloergómetro isocinético tal vez no sea lo suficientemente sensible como para evaluar los

efectos de esta suplementación. Teniendo en cuenta los efectos beneficiosos sobre la cadencia y la potencia observados en la prueba de carga inercial [48], parece que la suplementación con zumo de remolacha podría tener un efecto beneficioso durante este tipo de esfuerzo.

6.3 β -alanina

Autor	Tipo de estudio	Sujetos	Intervención	Cantidad de sustancia	Efectos valorados
Bellinger and Minahan 2016a [56]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	14 ciclistas masculinos entrenados	Suplementación con β -ALA durante 4 semanas	6,4 g/día	Series de ciclismo supramáximo hasta el agotamiento y contrarreloj de 1,4 y 10 km: \uparrow tiempo hasta el agotamiento (T_{max}), no efecto significativo sobre tiempo de finalización
Bellinger and Minahan 2016b [57]	Aleatorizado, controlado con placebo	17 ciclistas masculinos entrenados	Suplementación con β -ALA durante 4 semanas	6,4 g/día	Test de ciclismo supramáximo hasta el agotamiento y contrarreloj de 4 km: $\uparrow T_{max}$, \uparrow capacidad anaeróbica, \downarrow tiempo de finalización, \uparrow potencia anaeróbica media generada
James et al. 2014 [58]	Aleatorizado, doble ciego, controlado	19 ciclistas masculinos de categoría 1	Suplementación con β -ALA durante 4	6,4 g/día	Contrarreloj de 20 km: no efecto

	con placebo		semanas		significativo sobre rendimiento
Chung et al. 2014 [59]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	28 ciclistas/triatletas masculinos bien entrenados	Suplementación con β -ALA durante 6 semanas	6,4 g/día	Contrarreloj de 1 h: \uparrow carnosina muscular, \downarrow acidosis inducida por el ejercicio, no efecto significativo sobre pH y tiempo de finalización
Howe et al. 2013 [60]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	16 ciclistas masculinos altamente entrenados	Suplementación con β -ALA durante 4 semanas	8,65 mg/kg/día	Test máximo de 4 min y contracciones isocinéticas de rodilla: \uparrow potencia isocinética media, \downarrow índice de fatiga, no efectos significativos sobre potencia media generada y trabajo realizado en test máximo
Baguet et al. 2010 [61]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	14 estudiantes masculinos de educación física	Suplementación con β -ALA durante 4 semanas	4,8 g/día	6 min de ciclismo a alta intensidad: \downarrow acidosis inducida por el ejercicio, \downarrow retraso del

					componente rápido del VO ₂ , no efecto significativo sobre componente lento del VO ₂
Van Thienen et al. 2009 [62]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	17 ciclistas masculinos de moderadamente a bien entrenados	Suplementación con β-ALA durante 8 semanas	Semanas 1 y 2: 2 g/día Semanas 3 y 4: 3 g/día Semanas 5, 6, 7 y 8: 4 g/día	Carrera simulada de 110 min, contrarreloj de 10 min y sprint isocínético de 30 s: ↑ 11,4% potencia máxima generada, ↑ 5% potencia media generada en sprint, no efectos significativos sobre VO ₂ y lactato sanguíneo
Hill et al. 2007 [63]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	25 hombres físicamente activos	Suplementación con β-ALA durante 4 y 10 semanas	Semana 1: 4 g/día Semana 2: 4,8 g/día Semana 3: 5,6 g/día Semanas 4-10: 6,4 g/día	Test al 110% de la potencia máxima: ↑ carnosina muscular 58,8% tras 4 semanas y 80,1% tras 10 semanas, ↑ carnosina por igual en fibras tipo I y IIa, ↑ trabajo

					realizado 13% tras 4 semanas y 16,2% tras 10 semanas
--	--	--	--	--	---

La suplementación con β -ALA parece ser una buena ayuda ergogénica para los ejercicios de 1 a 4 minutos de intensidad, pero inefectiva para el ejercicio de resistencia o larga duración.

Las conclusiones tras el uso de la β -ALA como suplemento son muy variadas debido a que los estudios han sido muy dispares, utilizando pruebas muy diferentes ([56], [62], [57]). La mayoría de las variables evaluadas se relacionaron más con la mejora del rendimiento que con la disminución de la fatiga muscular. Además, los estudios fueron heterogéneos en cuanto a la dosis de β -ALA, el período de intervención y el protocolo de ejercicio, lo que dificulta la comparación de los resultados.

La disminución de la acidosis inducida por el ejercicio informada por algunos de los estudios analizados ([59], [61]) puede explicarse mediante el aumento de la carnosina muscular, la cual actúa como tampón fisiológico, en respuesta a la suplementación con β -ALA, como se ya se comentó en la introducción. Por lo tanto, durante el ejercicio de alta intensidad que implica un aumento de la acidosis muscular, como lo es el ciclismo de ruta profesional, esta capacidad amortiguadora podría aumentar la tolerancia al ejercicio [33]. Estudios como los de Hill et al. 2007 [63] y Chung et al. 2014 [59] demuestran dicho aumento significativo de la carnosina muscular a través de sus resultados. Con respecto a la disminución de la fatiga muscular observada en el estudio de Howe et al. 2013, la suplementación con β -ALA parece disminuirla también a expensas de la función amortiguadora de la carnosina [60].

También se sabe que la carnosina ejerce un papel fisiológico en la regulación de la sensibilidad al calcio del aparato contráctil y la liberación de calcio por el retículo sarcoplásmico. Es por ello por lo que el efecto ergogénico de la suplementación con β -ALA durante el ejercicio de alta intensidad, a consecuencia del aumento en los niveles de carnosina muscular, puede estar asociado con una mayor sensibilidad al calcio del aparato contráctil y producción de fuerza, además de con una reducción de la fatiga muscular [31]. De la misma forma que podría estar relacionado con el hecho de que el ejercicio de alta intensidad provoca una mayor acidosis, por lo que el papel modulador del equilibrio ácido-base muscular de la carnosina sería más evidente. Cuando la intensidad del ejercicio no implica un rendimiento completamente anaeróbico [22] (de 30 segundos a 10 minutos de duración con acidosis muscular alta), la suplementación crónica con β -ALA parece ser interesante para los ciclistas. De hecho, todos los estudios en los que se llevaron a cabo protocolos de ciclismo con esas características mostraron una mejora del rendimiento después de la suplementación crónica con β -ALA [63], [62], [60]. Es más, durante

la realización de una prueba de capacidad de ciclismo de alta intensidad al 110% de la potencia máxima, la cual duró entre 2 y 4 minutos, la suplementación con β -ALA mejoró el tiempo hasta el agotamiento en aproximadamente un 12% en participantes recreativamente activos en comparación con el placebo [63]. Además, Van Thienen et al. 2009 demostraron que la suplementación crónica con β -ALA puede mejorar el rendimiento del ciclismo de velocidad tras una carrera ciclista simulada de 110 minutos en comparación con el grupo placebo [62]. De la misma forma que 4 semanas de suplementación con β -ALA dieron como resultado cambios positivos en el rendimiento de la prueba de tiempo y la producción de fuerza muscular de corta duración en ciclistas altamente entrenados [60].

Sin embargo, el rendimiento de resistencia no mejora con la suplementación con β -ALA [62], [59], [56]. Este resultado podría explicarse por el hecho de que el ejercicio de larga duración no se asocia con una alta acidosis, lo que refuerza la hipótesis de que los efectos ergogénicos de β -ALA están relacionados con el papel de la carnosina como amortiguador intramuscular. También podría explicarse por el hecho de que el estado de capacitación puede afectar a la respuesta de la suplementación con β -ALA [31]. Un ejemplo de ello es que el entrenamiento de alta intensidad a largo plazo puede aumentar per se las concentraciones de carnosina en los músculos y, por lo tanto, en esta condición el efecto de la suplementación en sujetos con esos niveles de dicho dipéptido puede verse atenuado, como se mostró en el estudio de Van Thienen et al. 2009, a pesar de obtener efectos significativos positivos sobre la potencia generada [62].

Tras el análisis de los resultados observados en los distintos estudios recopilados, se podría afirmar que la dosis más eficaz se encuentra entre los 4,8 y los 6,4 g al día. Aunque se ha observado una relación lineal entre la ingesta de β -ALA y la concentración de carnosina en sangre, la dosificación de este suplemento ha estado limitada por los síntomas de parestesia derivados de su ingesta [22]. En general, parece que la β -ALA puede ser efectiva tras una suplementación crónica de unas 4 a 10 semanas [63].

Los hallazgos inconsistentes de algunos de los estudios analizados, como sucede con los de James et al. 2014 [58], pueden estar relacionados con el período de suplementación, la dosis, el tipo de ejercicio empleado, el estado de capacitación de los participantes, el tamaño de la muestra y los problemas metodológicos propios de los ensayos controlados aleatorizados. Asimismo, existe evidencia actual sobre la capacidad de absorción y utilización de β -ALA por parte del músculo esquelético, la cual varía individualmente. Se especula que la respuesta ante la suplementación con β -ALA es similar a la de la suplementación con Cr, cuya respuesta depende de los niveles preexistentes de Cr muscular, además de que aproximadamente el 20% de los individuos no responden a la misma. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el bajo tamaño de la muestra en combinación con la discreta magnitud observada en aquellos estudios en los que la suplementación con β -ALA no dio lugar a efectos significativos sobre el rendimiento, podría resultar en un bajo poder estadístico en dichos estudios [31]. Por tanto,

aunque las mejoras de ciertos parámetros no fueran estadísticamente significativas en los estudios, la relevancia de ese efecto en una situación competitiva no debería descartarse.

6.4 Bicarbonato de sodio

Autor	Tipo de estudio	Sujetos	Intervención	Cantidad de sustancia	Efectos valorados
Gough et al. 2018 [34]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	11 ciclistas masculinos entrenados	Suplementación aguda con NaHCO_3 individualizada según el tiempo de alcance del pico de HCO_3^- sanguíneo	P1: 0,2 g/kg P2: 0,3 g/kg	Contrarreloj de 4 km: ↓ tiempo de finalización, ↑ potencia media generada, ↑ velocidad media, ↑ HCO_3^- sanguíneo
Egger et al. 2014 [64]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover, unicéntrico	21 ciclistas (16 hombres y 5 mujeres) bien entrenados	Suplementación aguda con NaHCO_3	0,3 g/kg	30 min de ciclismo al 95% del umbral de lactato (LT) individual: ↑ T_{\max} , ↑ pH, HCO_3^- y lactato sanguíneos
Northgraves et al. 2014 [65]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	7 hombres físicamente activos	Suplementación aguda con NaHCO_3	0,3 g/kg	Contrarreloj de 40 km: ↑ HCO_3^- sanguíneo, no efecto significativo sobre rendimiento
Driller et al.	Aleatorizado,	8 ciclistas	Protocolos de	Carga	Prueba de

2012 [66]	doble ciego, controlado con placebo, crossover	masculinos bien entrenados	carga aguda y de 3 días con NaHCO ₃	aguda (P1): 0,3 g/kg Carga de 3 días (P2): 0,4 g/kg/día	esfuerzo de 4 min: ↑ potencia media generada (por igual), ↑ HCO ₃ ⁻ sanguíneo (sobre todo en P1)
Zabala et al. 2011 [67]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	10 ciclistas de BMX de élite	Suplementación aguda con NaHCO ₃	0,3 g/kg	WanT: ↑ HCO ₃ ⁻ sanguíneo, no efectos significativos sobre potencia, fatiga y RPE
Matsuura et al. 2007 [68]	Aleatorizado, simple ciego, controlado con placebo	8 hombres físicamente activos	Suplementación aguda con NaHCO ₃	0,3 g/kg	Sprints repetidos de 10 s: ↓ tasa de disminución de HCO ₃ ⁻ plasmático, no efectos significativos sobre pH y lactato sanguíneos, rendimiento, VO ₂ y reclutamiento muscular
Stephens et al. 2002 [69]	Aleatorizado, doble ciego, controlado	6 ciclistas/triatletas masculinos bien	Suplementación aguda con NaHCO ₃	0,3 g/kg	60 min de ciclismo prolongado e

	con placebo	entrenados			intenso: ↑ HCO ₃ ⁻ sanguíneo, ↓ [H ⁺] sanguínea y muscular, no efectos significativos sobre lactato sanguíneo, glucógeno, Cr, PCr y ATP musculares, y tiempo de finalización
--	-------------	------------	--	--	---

Parece que la suplementación con NaHCO₃ puede proporcionar un efecto ergogénico durante el ejercicio de alta intensidad y corta duración (no inferior a 30 segundos).

Un aumento en la capacidad de amortiguación mediante incrementos en el HCO₃⁻ sanguíneo puede dar lugar a mejoras en la capacidad de ejercicio y el rendimiento [64], [66]. La magnitud de este aumento parece influir en la probabilidad de que se manifieste un efecto ergogénico, aunque, incluso después de aumentos significativos del HCO₃⁻ en sangre, no todas las investigaciones son unánimes [65], [69], [67]. Estos resultados equívocos también pueden deberse a los protocolos de ejercicio empleados. Si dichas mejoras dependen de los incrementos en la capacidad de amortiguación, el ejercicio debe estar limitado por una mayor acumulación de H⁺. En el estudio de Zabala et al. 2011 se muestra que el rendimiento del ejercicio de corta duración, un sprint de ciclismo de 30 segundos en este caso, no se ve afectado por los cambios en el pH muscular [67], mientras que las actividades basadas en la resistencia dependen cada vez más de las fuentes de energía aeróbica sin acompañarse de una mayor acidosis muscular. Por lo tanto, las mejoras posteriores a la suplementación con NaHCO₃, probablemente se limitan a tareas de ejercicio específicas que están significativamente influenciadas por modificaciones en el equilibrio ácido-base [35]. De hecho, como se comentó en el apartado anterior de esta revisión, la suplementación con β-ALA, que aumenta la capacidad amortiguadora intracelular a través del aumento del contenido de carnosina muscular, ha demostrado ser más efectiva durante el ejercicio de alta intensidad de 30 segundos a 10 minutos de duración, mientras que el ejercicio de duración más larga y más corta no se vio afectado.

Dado que el mecanismo de acción del aumento del HCO_3^- sanguíneo es similar al de la suplementación con β -ALA (es decir, el aumento de la capacidad de amortiguación), se esperan resultados comparables.

De hecho, el análisis de los resultados parece sugerir exactamente eso, ya que a pesar del aumento de la concentración de HCO_3^- en sangre observado tras la suplementación con una dosis de 0,3 g/kg de NaHCO_3 , el rendimiento durante ejercicios de 30 [67] y 10 segundos de duración [68] no se vio afectado, mientras que el de ejercicios de una duración de entre 2 y 4 minutos mejoró significativamente [66]. Idénticos resultados fueron mostrados después de la suplementación durante 3 días con 0,4 g/kg de NaHCO_3 al día [66]. A pesar de que los resultados de uno de los estudios analizados sugieren que la suplementación aguda con NaHCO_3 puede resultar beneficiosa para un ejercicio de mayor duración [64], el resto no informaron de mejoras sobre el rendimiento del ejercicio de resistencia continua tras la suplementación [65], [69].

Una dosis de 0,3 g/kg de NaHCO_3 es la más comúnmente empleada en la literatura [35], de ahí que haya sido utilizada en todos y cada uno de los estudios analizados. La evidencia científica más reciente sugiere que el momento de la ingestión de NaHCO_3 puede ser uno de los factores moduladores clave de la respuesta ergogénica frente al aumento del HCO_3^- circulante. Haciendo coincidir el ejercicio con el punto en el que es probable que se llegue al pico de HCO_3^- sanguíneo, se maximizaría la posibilidad de mejorar el rendimiento, ya que se potenciaría la capacidad de amortiguación. De esta forma, determinar el tiempo hasta el alcance de la concentración máxima de HCO_3^- en sangre puede permitir que se emplee una dosis de NaHCO_3 más baja. Esto se demuestra en los resultados obtenidos por Gough et al. 2018, ya que las mejoras en las variables relacionadas con el rendimiento obtenidas con el uso de 0,2 g/kg fueron similares a las observadas con 0,3 g/kg, mientras que el tiempo de finalización de una prueba de 4 km no difirió entre las dos dosis [34].

Tomados en conjunto, los resultados recopilados sugieren que la probabilidad de obtener una ventaja competitiva a expensas del aumento de HCO_3^- puede depender, en parte, de las características del ejercicio realizado, cuya duración e intensidad parecen ser los factores clave. De esta forma, el tipo de ejercicio realizado será un factor determinante del efecto ergogénico de la suplementación con NaHCO_3 , por lo que no se puede pasar por alto. Dicho efecto sólo debe esperarse durante aquellos ejercicios limitados por la acumulación de H^+ , como el ejercicio continuo de alta intensidad, lo que se traduciría dentro ciclismo de ruta profesional en una contrarreloj, el consolidar una escapada, o los relevos para alcanzar dicha escapada. Dentro de éstos también se incluyen las actividades repetidas de alta intensidad, como las arrancadas y/o demarrajés por parte de los ciclistas de ruta profesional para adquirir ventaja competitiva respecto a otros ciclistas. Por último, como ya se ha explicado en el párrafo anterior, para

maximizar las posibilidades de un efecto ergogénico, la suplementación con NaHCO_3 debe ocurrir en el momento determinado del ejercicio en el que se alcance la concentración máxima de HCO_3^- en sangre, el cual dependerá de cada individuo [34].

6.5 Cafeína

Autor	Tipo de estudio	Sujetos	Intervención	Cantidad de sustancia	Efectos valorados
Felippe et al. 2018 [70]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	9 ciclistas masculinos de competición	Suplementación aguda con cafeína	5 mg/kg 75 min antes del ejercicio	Contrarreloj de 4 km: ↑ potencia media generada, reclutamiento muscular y trabajo realizado por encima de la potencia máxima, ↓ tiempo de finalización, mayor ↓ fuerza de contracción del cuádriceps al final del ejercicio por ↑ fatiga muscular, no efectos significativos sobre función neuromuscular y fatiga central
Guest et al.	Aleatorizado,	113 atletas	Suplementación	- P1: 2	Contrarreloj

2018 [71]	doble ciego, controlado con placebo	masculinos de competición	aguda con cafeína	mg/kg - P2: 4 mg/kg	de 10 km: ↓ 3% tiempo de finalización con P2, interacción significativa de CAF con gen CYP1A2 respecto al tiempo de finalización: ↓ 4,8% con P1 y 6,8% con P2 en genotipo AA, ↑ 13,7% con P2 en genotipo CC, no efecto significativo en genotipo AC
Santos et al. 2013 [72]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	8 ciclistas masculinos entrenados	Suplementación aguda con cafeína	5 mg/kg 1 h antes del ejercicio	Contrarreloj de 4 km: ↑ potencia media generada, ↑ contribución anaeróbica en km 2,2, 2,4 y 2,6, ↓ tiempo de finalización, no efectos significativos sobre contribución aeróbica y

					anaeróbica, trabajo aeróbico, anaeróbico y total, fatiga, lactato sanguíneo, FC y RPE
Desbrow et al. 2012 [73]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	16 ciclistas masculinos bien entrenados	Suplementación aguda con cafeína	3 mg/kg y 6 mg/kg 1,5 h antes del ejercicio	60 min de ciclismo al 75% de la potencia máxima: ↑ rendimiento y FC, no efectos significativos sobre RPE ni diferencias significativas entre ambas
Astorino et al. 2012 [74]	Aleatorizado, simple ciego, controlado con placebo, crossover	9 adultos (8 hombres y 1 mujer) entrenados en resistencia	Repetibilidad de la suplementación aguda con cafeína	5 mg/kg 1 h antes del ejercicio en 2 días separados	Contrarreloj de 10 km: ↑ tiempo de finalización 1,6% día 1 y 1,9% día 2, ↓ rendimiento en 7 sujetos, ↑ FC, no efectos significativos sobre RPE ni diferencias significativas entre ambos
Wiles et al. 2006 [75]	Aleatorizado, doble ciego, controlado	8 ciclistas masculinos de carretera de	Suplementación aguda con cafeína	5 mg/kg 1 h antes del	Contrarreloj de 1 km: ↓ 3,1% tiempo

	con placebo	competición		ejercicio	de finalización, ↑ 3.1% potencia media, 8.1% potencia máxima y velocidad media
Doherty et al. 2004 [76]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	11 ciclistas masculinos entrenados	Suplementación aguda con cafeína	5 mg/kg 1 h antes del ejercicio	2 min de ciclismo al 100% de la potencia máxima seguidos de test máximo de 1 min: ↓ RPE en 2 min, ↑ potencia media generada en test máximo, ↑ lactato sanguíneo tras finalizar

La CAF es uno de los compuestos ergogénicos con más utilidad para el ciclismo de ruta profesional, debido a sus múltiples efectos beneficiosos sobre el rendimiento durante el mismo.

El efecto ergogénico de la CAF más respaldado científicamente es la mejora de la resistencia aeróbica durante el ejercicio aeróbico prolongado. Esta mejora se ha demostrado en multitud de deportes aeróbicos [22], entre los que se incluye el ciclismo de ruta profesional. Dicho efecto queda demostrado en los resultados obtenidos por Desbrow et al. 2012 [73]. Es por ello por lo que la mayoría de los estudios que han sido recopilados en esta revisión se centran más en aquellos ejercicios en los que se combinan ambos metabolismos, el aeróbico y el anaeróbico, como las pruebas contrarreloj, sobre los cuales los efectos de la suplementación con CAF están menos claros. Dentro de los protocolos específicos que incluyen actividades anaeróbicas se encuentra el estudio realizado por Wiles et al. 2006, que evaluó la efectividad de la suplementación aguda con CAF, más concretamente de una dosis de 5 mg/kg de masa

corporal consumida 60 minutos antes del ejercicio, sobre una contrarreloj de 1 km, la cual se asoció con una mejora del 3,1% en el tiempo de finalización de la prueba, y un incremento del 3.1% y 8.1% en la potencia media y máxima generadas, respectivamente [75].

Las mejoras del rendimiento y el consecuente incremento en la cantidad de trabajo total realizado por encima de la potencia máxima que se muestran en los resultados del estudio de Felipe et al. 2018 tras la suplementación con CAF podrían explicarse mediante los efectos centrales de la misma. Dicho efecto ergogénico se manifiesta a través de la reducción del tiempo de finalización de una contrarreloj de 4 km [70], parámetro que también se ve disminuido en la mayoría de los estudios analizados que emplearon pruebas de contrarreloj de distancia media (entre 4 y 10 km) [71], [72], [74], [75]. Aunque según Astorino et al. 2012 las diferencias respecto a la RP entre las condiciones de suplementación con CAF y placebo no fueron significativas, el incremento de la potencia generada con una RPE similar durante dicha suplementación indican una reducción del ratio potencia generada/RPE [74]. Además, el mayor reclutamiento muscular observado por Felipe et al. 2018 respalda también a uno de los efectos centrales de la CAF, el cual resulta beneficioso en términos de rendimiento del ejercicio [70]. Como ya se comentó en la introducción, el efecto central más reconocido de la CAF es su acción antagónica sobre los receptores de adenosina en el SNC, lo que se traduce en una reducción de la RPE [76]. También se ha visto que la CAF puede tener efectos hipoalgésicos, lo que podría aumentar la tolerancia a las molestias durante el ejercicio [76].

La suplementación con CAF parece contribuir en la distribución por parte de los atletas de sus recursos energéticos a lo largo de pruebas contrarreloj de media distancia, las cuales se supone que están en el dominio de intensidad severa (contrarreloj de 500 m a 4 km) [70]. Esto les permitiría preservar la capacidad de generación de potencia anaeróbica hasta las etapas finales de dicho evento [72]. Sin embargo, para comprobar dicha hipótesis hubiera sido necesario el monitoreo simultáneo del trabajo total realizado por encima del pico de potencia y la fatiga periférica [70]. Un aumento experimental del trabajo realizado por encima de la potencia máxima podría proporcionar nuevos conocimientos sobre la relación entre este último y la acumulación de fatiga periférica durante el ejercicio a ritmo propio. La CAF parece ser un candidato prometedor para probar esta relación, ya que se ha observado que es capaz de aumentar el trabajo total realizado por encima del pico de potencia [70], además de aumentar la potencia generada durante una contrarreloj de 1 [75] y 4 km [72], [70].

Valorando los resultados obtenidos de los estudios analizados de forma general, se sugiere que una buena pauta de suplementación con CAF podría ser administrar una dosis de 3-6 mg/kg 1 hora antes de comenzar el ejercicio, ya que dosis inferiores a éstas no mostraron efectos significativos sobre el rendimiento [71]. Sin embargo, es necesario recordar que el efecto de una misma cantidad de CAF puede ser muy diferente en cada individuo. Depende el grado de

habitación a esta sustancia y de la actividad del gen CYP1A2 [22]. Esto último quedó demostrado por Guest et al. 2018 en su estudio, en el que se valoró el efecto ergogénico de la suplementación aguda con CAF sobre una contrarreloj de 1 km en función de los distintos genotipos de dicho gen. Los atletas que presentaban el genotipo AA mostraron una mayor disminución del tiempo de finalización de la prueba tras la suplementación con ambas dosis de CAF (2 mg/kg y 3 mg/kg), mientras que los que contaban con el genotipo CC sólo evidenciaron efectos con la dosis más alta y en menor medida que los del genotipo AA. Sobre aquellos que presentaban el genotipo AC la suplementación con CAF no tuvo ningún efecto [71].

6.6 Bebidas y/o geles de carbohidratos

Autor	Tipo de estudio	Sujetos	Intervención	Cantidad de sustancia	Efectos valorados
Newell et al. 2015 [77]	Aleatorizado, simple ciego, controlado con placebo, crossover	20 ciclistas masculinos bien entrenados	Suplementación aguda con distintas bebidas de CHO	Bebida 1 (B1): 20 g/h, bebida 2 (B2): 39 g/h, bebida 3 (B3): 64 g/h durante el ejercicio CHO empleados: glucosa	2 h de ciclismo al 95% del LT y 30 min al 70% de la potencia máxima: ↓ tiempo de finalización 6,1% con B2 y 6,5% con B3, no efectos significativos sobre potencia
Oosthuysen et al. 2015 [78]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	9 ciclistas masculinos bien entrenados	Suplementación aguda con distintas bebidas de CHO	63 g/h durante el ejercicio CHO empleados: isomaltulosa (B1) o una mezcla de fructosa y maltodextrina en proporción 0,8:1 (B2)	2 h de ciclismo al 60% de la potencia máxima seguidas de contrarreloj de 16 km: ↑ tiempo de finalización y molestias gastrointestinales con B1
Schweitzer et al. 2009 [79]	Aleatorizado, simple ciego, controlado	10 ciclistas (8 hombres y 2 mujeres) bien entrenados	Suplementación aguda con bebida de CHO	75 g/15 min durante todo el ejercicio (T1),	2 h de ciclismo al 67% del VO _{2max} seguidas

	con placebo	entrenados	a distintos tiempos de ingesta	durante la 1ª h (T2), y durante la 2ª h (T3) CHO empleados: mezcla de sacarosa y dextrosa	de test máximo de 15 min: no diferencias significativas sobre trabajo realizado durante test máximo y glucemia al final del ejercicio, mayor pico de glucosa sanguínea en 1ª h con T2 y en 2ª h con T3
Saunders et al. 2007 [80]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo	13 ciclistas (8 hombres y 5 mujeres) de competición	Suplementación aguda con gel de CHO y gel de CHO y proteína	Cada 15 min durante el ejercicio: Bebida CHO (BC): 0,15 g/kg Bebida CHO + proteína (BCP): 0.15 g/kg + 0.038 g/kg CHO empleados: mezcla de maltodextrina y fructosa	Prueba hasta el agotamiento al 75% del VO _{max} : ↑ creatinquinasa (CK) sanguínea con BC, ↑ distancia recorrida (un 13% más con BCP), no diferencias significativas entre géneros ni sobre VO ₂ , FC, lactato y glucosa sanguíneos y RPE
Halsen et al. 2004 [81]	Aleatorizado, doble ciego, controlado con placebo, crossover	6 ciclistas masculinos entrenados en resistencia	Protocolo de suplementación con bebida de CHO pre, durante y post entrenamiento alto y bajo en	Bebida con 6,4% (P1) o 2% (P2) de CHO: 500 ml/h la h previa y durante el entrenamiento Bebida con 20% (P1) o 2% (P2) de	Entrenamiento normal durante 1 semana (EN), intenso durante 8 días (EI) y de recuperación durante 2

			CHO	CHO: 1000 ml/h la h posterior al entrenamiento	semanas (ER): ↓ T _{max} (mayor con P2 que con P1) y ↑ cambios de humor durante EI; ↓ oxidación de glucógeno muscular, ↑ oxidación lipídica y ↓ cortisol y epinefrina plasmáticas (mayor con P2 que con P1) tras EI
--	--	--	-----	--	--

La suplementación aguda con geles y/o bebidas de CHO es una estrategia esencial para la mejora del rendimiento durante el ciclismo de ruta profesional, siendo suficiente una dosis de 39 g/h.

Actualmente se especula que las estrategias previas al ejercicio para mantener los niveles de glucógeno o glucosa en sangre aumentan el rendimiento de este cuando la ingestión de CHO continúa a lo largo de los períodos de ejercicio prescritos. Es más, si se descuidan las estrategias de alimentación con CHO antes del ejercicio, el suministro de CHO apropiados durante el mismo puede ayudar a compensar el potencial de disminución del rendimiento [40]. A este respecto, se deben considerar los hallazgos del estudio de Newell et al. 2015, que contó con 20 ciclistas experimentados y bien entrenados para realizar cuatro condiciones de suplementación diferentes (sin control de CHO [0 g/h], 20 g/h, 39 g/h o 64 g/h) durante la consecución de 2 horas de ciclismo al 95% del umbral de lactato seguidas de la compleción de 30 minutos al 70% de la potencia máxima. Cuando los CHO se ingirieron en una dosis de 39 o 64 g/h, el rendimiento de la última prueba mejoró significativamente en comparación con el grupo de control. Es importante destacar que no se encontraron diferencias significativas en el rendimiento entre estas dos estrategias de suplementación [77], lo que sugiere que para aquellos ciclistas que no puedan tolerar dosis más altas de CHO, un régimen moderado de suplementación con estos últimos durante un periodo prolongado de ejercicio puede promover mejoras similares en el rendimiento.

La alta disponibilidad de CHO durante el ejercicio ha demostrado ser esencial para optimizar las adaptaciones del entrenamiento a largo plazo [82], lo cual queda confirmado por Halson et al. 2004, quienes simularon un campamento de entrenamiento donde los ciclistas realizaron de 1 a 2 semanas de entrenamiento intensificado. Uno de los hallazgos de este estudio fue que cuando los atletas recibieron suplementos de CHO y una mayor ingesta de CHO en general, las reducciones en el rendimiento fueron menos pronunciadas y los síntomas de exceso se redujeron, a pesar del hecho de que realizaron más trabajo en el entrenamiento. Por lo tanto, existe evidencia de que, durante el entrenamiento extremo con trabajo repetido de alta intensidad, se prefiere un suministro de CHO más alto. Sin embargo, se debe tener en cuenta que dicho utilizó un volumen de entrenamiento extremo y el resultado después de 1 a 2 semanas fue una disminución del rendimiento en todas los grupos [81].

Además, el momento en el que se suministran los CHO durante el ejercicio sigue siendo una prioridad una vez comienza un entrenamiento o competición. Se ha visto que proporcionarlos a intervalos regulares durante el ejercicio de resistencia puede contribuir a la optimización del rendimiento y al mantenimiento de la glucemia [40]. Sin embargo, el único estudio de los analizados en el que se evaluó la suplementación con CHO a distintos tiempos de ingesta fue el de Schweitzer et al. 2009, quienes concluyeron que la entrega preferencial de CHO durante la primera o la segunda mitad de una serie de ejercicios controlados de ciclismo no ofrecía mejoras en el rendimiento [79]. De todas formas, el hecho de no haber recopilado más estudios que evalúen este aspecto de dicha suplementación impide contrastar los resultados de este último.

Cuando se ingieren solos, la hidrólisis de la mayoría de los CHO es rápida y no limita la tasa de digestión y absorción. Por lo tanto, la velocidad a la que los polímeros de glucosa como la maltosa, la maltodextrina y el almidón se pueden digerir, absorber y usar como fuente de combustible no es sustancialmente más lenta que la de la glucosa. Además, la hidrólisis de la sacarosa también es rápida y supera la tasa de absorción intestinal de la glucosa y la fructosa. Una excepción a esta regla es la isomaltulosa. Debido a los diferentes enlaces que unen la glucosa y la fructosa, la tasa de hidrólisis de la isomaltulosa es drásticamente más lenta que la de la sacarosa. La isomaltulosa produce una respuesta postprandial glucémica e insulinémica más baja, y suprime la oxidación de la grasa en menor medida que la sacarosa [41]. Sin embargo, presumiblemente debido a esta lenta velocidad de digestión y absorción, la isomaltulosa exacerba la angustia gastrointestinal cuando se consume en grandes cantidades durante el ejercicio [78].

Las combinaciones de CHO y proteínas son otras de las estrategias tradicionales empleadas por atletas tanto de resistencia como de fuerza con el fin de aumentar su rendimiento durante el ejercicio, promover la reposición de glucógeno, minimizar el daño muscular y promover un balance positivo de nitrógeno [40]. Lo cual se confirma con lo observado por el ensayo



realizado por Saunders et al., en el que se suplementó a 18 ciclistas de competición con dos geles, uno que contenía únicamente CHO y otro de CHO más proteína, e informó que la ingesta de una combinación de CHO (0.15 g/kg) + proteína (0.038 g/kg) a lo largo de una serie exhaustiva de ejercicios de ciclismo mejoró significativamente el rendimiento de los mismos en un mayor porcentaje que la de CHO por si solos, sin mostrar diferencias significativas entre hombres y mujeres [80]. Por tanto, la suplementación con esta combinación de nutrientes podría ser interesante para los ciclistas de ruta profesional.

7. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas tras la elaboración de este trabajo de revisión bibliográfica, respecto a las ayudas ergogénicas nutricionales con mayor nivel de evidencia científica que pueden contribuir a la reducción de la fatiga durante el ciclismo de ruta profesional, se describen a continuación:

- La suplementación con creatina permite un retraso de la fatiga y, a su vez, una mejora del rendimiento durante estímulos físicos de muy alta intensidad, realizados tanto en competición como en protocolos de entrenamiento. Además, aumenta las reservas de fosfocreatina a nivel muscular, molécula clave en los esfuerzos de máxima intensidad.
- El uso de zumo de remolacha como suplemento promueve la vasodilatación, aumentando el flujo sanguíneo a nivel muscular, lo que se traduce en una mayor resistencia a la fatiga debido al incremento del aporte de oxígeno y nutrientes al músculo.
- La suplementación con β -alanina proporciona un aumento de los niveles de carnosina a nivel muscular. Durante esfuerzos a intensidades submáximas, en los cuales se genera una gran acidosis por la acumulación de iones de hidrógeno, la carnosina ejerce su función de tampón intracelular amortiguando la acidosis muscular. Esto favorece la reducción de la fatiga y de la pérdida de rendimiento.
- El bicarbonato de sodio es un suplemento especialmente indicado para esfuerzos repetitivos de alta intensidad. Es el tampón extracelular más efectivo contra la acidosis inducida por el ejercicio, evitando el descenso del pH sanguíneo y, con ello, incrementando la efectividad muscular. Dicho efecto retrasa la aparición de la fatiga y aumenta el rendimiento.
- La suplementación con cafeína es la más investigada y a la cual se atribuyen múltiples beneficios ergogénicos. Al ser un inhibidor del SNC, disminuye el dolor asociado al ejercicio, ocasionando una reducción de la fatiga. Se recomienda indistintamente para esfuerzos aeróbicos y anaeróbicos.
- La ingestión de bebidas y/o geles de carbohidratos durante el ejercicio se hace imprescindible, ya que tanto la duración como la intensidad a la que se realiza acaban agotando las reservas endógenas de glucógeno muscular y hepático. Suplementar es la única forma de mantener el rendimiento y retrasar la aparición de la fatiga. También se emplean para la recarga de los depósitos de glucógeno una vez finalizado el ejercicio.

8. Bibliografía

- [1] A. E. Pancorvo Sandoval, “Diagnóstico y prevención de la fatiga crónica o del síndrome de alto rendimiento. Una propuesta de mecanismos de recuperación biológica,” *Cuad. Psicol. del Deport.*, vol. 3, no. 1, pp. 61–80, 2003.
- [2] C. R. Abbiss and P. B. Laursen, *Models to explain fatigue during prolonged endurance cycling*, vol. 35, no. 10. 2005.
- [3] R. M. Enoka and J. Duchateau, “Muscle fatigue: What, why and how it influences muscle function,” *J. Physiol.*, vol. 586, no. 1, pp. 11–23, 2008.
- [4] M. Hostrup and J. Bangsbo, “Limitations in intense exercise performance of athletes – effect of speed endurance training on ion handling and fatigue development,” *J. Physiol.*, vol. 595, no. 9, pp. 2897–2913, 2017.
- [5] R. H. Fitts, “The cross-bridge cycle and skeletal muscle fatigue,” pp. 551–558, 2008.
- [6] J. A. Martínez Mesa, “FATIGA. TIPOS Y CAUSAS,” *Rev. Cuba. Med. Deport. y Cult. Física.*, vol. 8, no. 3, pp. 1–14, 2013.
- [7] M. Rodríguez Abreu and A. Núñez Llobregat, “Aproximación teórica sobre la fatiga y el sobreentrenamiento,” *EFDeportes.com, Revista Digital. Buenos Aires, Año 15, N° 149, Octubre de 2010.*, 2010. [Online]. Available: <http://www.efdeportes.com/efd149/aproximacion-teorica-sobre-la-fatiga-y-el-sobreentrenamiento.htm>. [Accessed: 02-Jul-2018].
- [8] B. Pageaux and R. Lepers, “Fatigue induced by physical and mental exertion increases perception of effort and impairs subsequent endurance performance,” *Front. Physiol.*, vol. 7, no. NOV, 2016.
- [9] G. L. Close, D. L. Hamilton, A. Philp, L. M. Burke, and J. P. Morton, “New strategies in sport nutrition to increase exercise performance,” *Free Radic. Biol. Med.*, vol. 98, pp. 144–158, 2016.
- [10] S. L. Halson, “Monitorización de la fatiga y recuperación,” vol. 27, no. 135, pp. 1–6, 2014.
- [11] Á. Gil Hernández and F. Sánchez de Medina Contreras, “Tratado de nutrición,” 2013.
- [12] P. C. Lezama and G. Deportivo, “Ciclismo,” *Rev. AMD*, vol. II, no. 77, pp. 251–254, 1900.
- [13] A. Lucia, J. Hoyos, and J. L. Chicharro, “Physiology of professional road cycling,” *Sport. Med.*, vol. 31, no. 5, pp. 325–337, 2001.
- [14] Á. G. Hernández, “Tratado de nutrición. Composición y calidad de los alimentos,” p. 771, 2010.
- [15] A. E. Jeukendrup, “Nutrition for endurance sports: Marathon, triathlon, and road cycling,” *J. Sports Sci.*, vol. 29, no. SUPPL. 1, 2011.
- [16] E. Maunder, D. J. Plews, and A. E. Kilding, “Contextualising maximal fat oxidation during exercise: Determinants and normative values,” *Front. Physiol.*, vol. 9, no. MAY, 2018.

- pp. 1–13, 2018.
- [17] J. Morillas-Ruiz *et al.*, “The effects of an antioxidant-supplemented beverage on exercise-induced oxidative stress: Results from a placebo-controlled double-blind study in cyclists,” *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 95, no. 5–6, pp. 543–549, 2005.
- [18] N. Ørtenblad, H. Westerblad, and J. Nielsen, “Muscle glycogen stores and fatigue,” *J. Physiol.*, vol. 591, no. 18, pp. 4405–4413, 2013.
- [19] K. Southward, K. J. Rutherford-Markwick, and A. Ali, “The Effect of Acute Caffeine Ingestion on Endurance Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis,” *Sport. Med.*, vol. 48, no. 8, pp. 1913–1928, 2018.
- [20] P. Peeling, M. J. Binnie, P. S. R. Goods, M. Sim, and L. M. Burke, “Evidence-based supplements for the enhancement of athletic performance,” *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, vol. 28, no. 2, pp. 178–187, 2018.
- [21] R. Domínguez *et al.*, “Effects of beetroot juice supplementation on intermittent high-intensity exercise efforts,” *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, vol. 15, p. 2, 2018.
- [22] V. S. Moriones and J. I. Santos, “Ayudas ergogénicas en el deporte,” *Nutr. Hosp.*, vol. 34, no. 1, pp. 204–215, 2017.
- [23] R. L. Dalton *et al.*, “Hematological and hemodynamic responses to acute and short-term creatine nitrate supplementation,” *Nutrients*, vol. 9, no. 12, 2017.
- [24] R. C. Hickner, D. J. Dyck, J. Sklar, H. Hatley, and P. Byrd, “Effect of 28 days of creatine ingestion on muscle metabolism and performance of a simulated cycling road race,” *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, vol. 7, pp. 1–13, 2010.
- [25] R. J. Maughan *et al.*, “IOC consensus statement: Dietary supplements and the high-performance athlete,” *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, vol. 28, no. 2, pp. 104–125, 2018.
- [26] D. L. Crisafulli, H. H. Buddhadev, L. R. Brilla, G. R. Chalmers, D. N. Suprak, and J. G. San Juan, “Creatine-electrolyte supplementation improves repeated sprint cycling performance: A double blind randomized control study,” *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–11, 2018.
- [27] T. P. Polyviou *et al.*, “Thermoregulatory and cardiovascular responses to creatine, glycerol and alpha lipoic acid in trained cyclists,” *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, vol. 9, no. 1, p. 1, 2012.
- [28] C. M. T. van der Avoort, L. J. C. van Loon, M. T. E. Hopman, and L. B. Verdijk, “Increasing vegetable intake to obtain the health promoting and ergogenic effects of dietary nitrate,” *Eur. J. Clin. Nutr.*, pp. 1–5, 2018.
- [29] R. Domínguez *et al.*, “Effects of beetroot juice supplementation on cardiorespiratory endurance in athletes. A systematic review,” *Nutrients*, vol. 9, no. 1, pp. 1–18, 2017.
- [30] J. Van Hoorebeke, C. Trias, B. Davis, C. Lozada, and G. Casazza, “Betain-Rich Concentrate Supplementation Improves Exercise Performance in Competitive Runners,”

- Sports*, vol. 4, no. 3, p. 40, 2016.
- [31] P. Berti Zanella, F. Donner Alves, and C. Guerini de Souza, “Effects of beta-alanine supplementation on performance and muscle fatigue in athletes and non-athletes of different sports: a systematic review.” *J. Sports Med. Phys. Fitness*, vol. 57, no. 9, pp. 1132–1141, 2017.
- [32] J. A. McQuillan, D. K. Dulson, P. B. Laursen, and A. E. Kilding, “Dietary Nitrate Fails to Improve 1 and 4km Cyclong Performance in Highly-Trained Cyclists,” *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, vol. 27, no. 3, pp. 255–263, 2017.
- [33] A. Goron and C. Moinard, “Amino acids and sport: a true love story?,” *Amino Acids*, vol. 50, no. 8, pp. 969–980, 2018.
- [34] L. A. Gough, S. K. Deb, S. A. Sparks, and L. R. McNaughton, “Sodium bicarbonate improves 4 km time trial cycling performance when individualised to time to peak blood bicarbonate in trained male cyclists,” *J. Sports Sci.*, vol. 36, no. 15, pp. 1705–1712, 2018.
- [35] A. B. Heibel, P. H. L. Perim, L. F. Oliveira, L. R. McNaughton, and B. Saunders, “Time to Optimize Supplementation: Modifying Factors Influencing the Individual Responses to Extracellular Buffering Agents,” *Front. Nutr.*, vol. 5, no. May, pp. 1–12, 2018.
- [36] L. A. Gough, S. K. Deb, A. Sparks, and L. R. McNaughton, “The Reproducibility of 4-km Time Trial (TT) Performance Following Individualised Sodium Bicarbonate Supplementation: a Randomised Controlled Trial in Trained Cyclists,” *Sport. Med. - Open*, vol. 3, no. 1, 2017.
- [37] L. M. Burke, “Practical Issues in Evidence-Based Use of Performance Supplements: Supplement Interactions, Repeated Use and Individual Responses,” *Sport. Med.*, vol. 47, no. s1, pp. 79–100, 2017.
- [38] A. R. Getzin, C. Milner, and M. Harkins, “Fueling the Triathlete: Evidence-Based Practical Advice for Athletes of All Levels,” *Curr. Sports Med. Rep.*, vol. 16, no. 4, pp. 240–246, 2017.
- [39] J. Grgic, “Caffeine ingestion enhances Wingate performance: a meta-analysis,” *Eur. J. Sport Sci.*, vol. 18, no. 2, pp. 219–225, 2018.
- [40] C. M. Kerksick *et al.*, “International society of sports nutrition position stand: Nutrient timing,” *J. Int. Soc. Sports Nutr.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–21, 2017.
- [41] J. T. Gonzalez, C. J. Fuchs, J. A. Betts, and L. J. C. van Loon, “Glucose plus fructose ingestion for post-exercise recovery—greater than the sum of its parts?,” *Nutrients*, vol. 9, no. 4, pp. 1–15, 2017.
- [42] K. A. Tomcik *et al.*, *Effects of Creatine and Carbohydrate Loading on Cycling Time Trial Performance*, vol. 50, no. 1. 2018.
- [43] K. M. De Andrade Nemezio, R. Bertuzzi, C. R. Correia-Oliveira, B. Gualano, D. J. Bishop, and A. E. Lima-Silva, “Effect of Creatine Loading on Oxygen Uptake during a

- 1-km Cycling Time Trial,” *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 47, no. 12, pp. 2660–2668, 2015.
- [44] R. P. Ahmun, R. J. Tong, and P. N. Grimshaw, “The effects of acute creatine supplementation on multiple sprint cycling and running performance in rugby players,” *J. Strength Cond. Res.*, vol. 19, no. 1, pp. 92–97, 2005.
- [45] K. Havenetidis, O. Matsouka, C. B. Cooke, and A. Theodorou, “The use of varying creative regimens on sprint cycling,” *J. Sport. Sci. Med.*, vol. 2, no. 3, pp. 88–97, 2003.
- [46] J. P. Finn *et al.*, “Effect of creatine supplementation on metabolism and performance in humans during intermittent sprint cycling,” *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 84, no. 3, pp. 238–243, 2001.
- [47] M. Deutekom, J. G. M. Beltman, C. J. De Ruiter, J. J. De Koning, and A. De Haan, “No acute effects of short-term creatine supplementation on muscle properties and sprint performance,” *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 82, no. 3, pp. 223–229, 2000.
- [48] E. G. Rimer, L. R. Peterson, A. R. Coggan, and J. C. Martin, “Acute Dietary Nitrate Supplementation Increases Maximal Cycling Power in Athletes,” *Int J Sport. Physiol Perform*, vol. 11, no. 6, pp. 715–720, 2016.
- [49] K. E. MacLeod, S. F. Nugent, S. I. Barr, M. S. Koehle, B. C. Sporer, and M. J. MacInnis, “Acute Beetroot juice supplementation does not improve cycling performance in normoxia or moderate hypoxia,” *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, vol. 25, no. 4, pp. 359–366, 2015.
- [50] M. W. Hoon *et al.*, “Nitrate supplementation and high-intensity performance in competitive cyclists¹,” *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, vol. 39, no. 9, pp. 1043–1049, 2014.
- [51] D. J. Muggeridge, C. C. F. Howe, O. Spendiff, C. Pedlar, P. E. James, and C. Easton, “A single dose of beetroot juice enhances cycling performance in simulated altitude,” *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 46, no. 1, pp. 143–150, 2014.
- [52] D. P. Wilkerson, G. M. Hayward, S. J. Bailey, A. Vanhatalo, J. R. Blackwell, and A. M. Jones, “Influence of acute dietary nitrate supplementation on 50 mile time trial performance in well-trained cyclists,” *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 112, no. 12, pp. 4127–4134, 2012.
- [53] N. M. Cermak, M. J. Gibala, and L. J. C. van Loon, “Nitrate supplementation’s improvement of 10-km time-trial performance in trained cyclists,” *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, vol. 22, no. 1, pp. 64–71, 2012.
- [54] K. E. Lansley *et al.*, “Acute Dietary Nitrate Supplementation Improves Cycling Time Trial Performance,” *Med. Sci. Sport. Exerc.*, vol. 43, no. 6, pp. 1125–1131, 2011.
- [55] P. M. Christensen, M. Nyberg, and J. Bangsbo, “Influence of nitrate supplementation on VO₂ kinetics and endurance of elite cyclists,” *Scand. J. Med. Sci. Sport.*, vol. 23, no. 1, pp. 21–31, 2013.
- [56] P. M. Bellinger and C. L. Minahan, “The effect of β -alanine supplementation on cycling

- time trials of different length,” *Eur. J. Sport Sci.*, vol. 16, no. 7, pp. 829–836, 2016.
- [57] P. M. Bellinger and C. L. Minahan, “Metabolic consequences of β -alanine supplementation during exhaustive supramaximal cycling and 4000-m time-trial performance,” *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, vol. 41, no. 8, pp. 864–871, 2016.
- [58] R. M. James, S. B. Cooper, J. Robertson, D. Martin, R. C. Harris, and C. Sale, “Effect of β -alanine supplementation on 20 km cycling time trial performance,” *Rev. Bras. Educ. Física e Esporte*, vol. 28, no. 3, pp. 395–403, 2014.
- [59] W. Chung, A. Baguet, T. Bex, D. J. Bishop, and W. Derave, “Doubling of muscle carnosine concentration does not improve laboratory 1-Hr cycling time-trial performance,” *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, vol. 24, no. 3, pp. 315–324, 2014.
- [60] S. T. Howe, P. M. Bellinger, M. W. Driller, C. M. Shing, and J. W. Fell, “The effect of beta-alanine supplementation on isokinetic force and cycling performance in highly trained cyclists,” *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, vol. 23, no. 6, pp. 562–570, 2013.
- [61] A. Baguet, K. Koppo, A. Pottier, and W. Derave, “Beta-Alanine supplementation reduces acidosis but not oxygen uptake response during high-intensity cycling exercise,” *Eur J Appl Physiol*, vol. 108, no. 3, pp. 495–503, 2010.
- [62] R. Van Thienen, K. Van Proeyen, B. Vanden Eynde, J. Puype, T. Lefere, and P. Hespel, “ β -Alanine improves sprint performance in endurance cycling,” *Med. Sci. Sports Exerc.*, vol. 41, no. 4, pp. 898–903, 2009.
- [63] C. A. Hill *et al.*, “Influence of β -alanine supplementation on skeletal muscle carnosine concentrations and high intensity cycling capacity,” *Amino Acids*, vol. 32, no. 2, pp. 225–233, 2007.
- [64] F. Egger, T. Meyer, U. Such, and A. Hecksteden, “Effects of sodium bicarbonate on high-intensity endurance performance in cyclists: A double-blind, randomized cross-over trial,” *PLoS One*, vol. 9, no. 12, pp. 1–15, 2014.
- [65] M. J. Northgraves, D. J. Peart, C. A. Jordan, and R. V. Vince, “Effect of lactate supplementation and sodium bicarbonate on 40-km cycling time trial performance,” *J. Strength Cond. Res.*, vol. 28, no. 1, pp. 273–280, 2014.
- [66] M. W. Driller, J. R. Gregory, A. D. Williams, and J. W. Fell, “The effects of serial and acute NaHCO_3 loading in well-trained cyclists,” *J. Strength Cond. Res.*, vol. 26, no. 10, pp. 2791–7, 2012.
- [67] M. Zabala, A. B. Peinado, F. J. Calderón, J. Sampedro, M. J. Castillo, and P. J. Benito, “Bicarbonate ingestion has no ergogenic effect on consecutive all out sprint tests in BMX elite cyclists,” *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 111, no. 12, pp. 3127–3134, 2011.
- [68] R. Matsuura, T. Arimitsu, T. Kimura, T. Yunoki, and T. Yano, “Effect of oral administration of sodium bicarbonate on surface EMG activity during repeated cycling sprints,” *Eur. J. Appl. Physiol.*, vol. 101, no. 4, pp. 409–417, 2007.
- [69] T. J. Stephens, M. J. Mckenna, B. J. Canny, R. J. Snow, and G. K. Mcconell, “Effect of

- sodium bicarbonate on muscle metabolism during intense endurance cycling,” *Med. Sci. Sport. Exerc.*, vol. 34, no. 4, pp. 614–621, 2002.
- [70] L. C. Felipe, G. A. Ferreira, S. K. Lears, D. Boari, R. Bertuzzi, and A. E. Lima-Silva, “Caffeine increases both total work performed above critical power and peripheral fatigue during a 4-km cycling time trial,” *J. Appl. Physiol.*, vol. 124, no. 6, pp. 1491–1501, 2018.
- [71] N. Guest, P. Corey, J. Vescovi, and A. El-Sohemy, *Caffeine, CYP1A2 genotype, and endurance performance in athletes*, vol. 50, no. 8. 2018.
- [72] R. de A. Santos *et al.*, “Caffeine Alters Anaerobic Distribution and Pacing during a 4000-m Cycling Time Trial,” *PLoS One*, vol. 8, no. 9, 2013.
- [73] B. Desbrow, C. Biddulph, B. Devlin, G. D. Grant, S. Anoopkumar-Dukie, and M. D. Leveritt, “The effects of different doses of caffeine on endurance cycling time trial performance,” *J. Sports Sci.*, vol. 30, no. 2, pp. 115–120, 2012.
- [74] T. A. Astorino, T. Cottrell, A. T. Lozano, K. Aburto-Pratt, and J. Duhon, “Increases in cycling performance in response to caffeine ingestion are repeatable,” *Nutr. Res.*, vol. 32, no. 2, pp. 78–84, 2012.
- [75] J. D. Wiles, D. Coleman, M. Tegerdine, and I. L. Swaine, “The effects of caffeine ingestion on performance time, speed and power during a laboratory-based 1 km cycling time-trial,” *J. Sports Sci.*, vol. 24, no. 11, pp. 1165–1171, 2006.
- [76] M. Doherty, P. M. Smith, M. G. Hughes, and R. C. R. Davison, “Caffeine lowers perceptual response and increases power output during high-intensity cycling,” *J. Sports Sci.*, vol. 22, no. 7, pp. 637–643, 2004.
- [77] M. L. Newell, A. M. Hunter, C. Lawrence, K. D. Tipton, and S. D. R. Galloway, “The ingestion of 39 or 64 g·hr⁻¹ of carbohydrate is equally effective at improving endurance exercise performance in cyclists,” *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, vol. 25, no. 3, pp. 285–292, 2015.
- [78] T. Oosthuysen, M. Carstens, and A. M. E. Millen, “Ingesting isomaltulose versus fructose-maltodextrin during prolonged moderate-heavy exercise increases fat oxidation but impairs gastrointestinal comfort and cycling performance,” *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.*, vol. 25, no. 5, pp. 427–438, 2015.
- [79] G. G. Schweitzer, J. D. Smith, and J. D. Lecheminant, “Timing Carbohydrate Beverage Intake During Prolonged Moderate Intensity Exercise Does Not Affect Cycling Performance,” *Int. J. Exerc. Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 4–18, 2009.
- [80] M. J. Saunders, N. D. Luden, and J. E. Herrick, “Consumption of an oral carbohydrate-protein gel improves cycling endurance and prevents postexercise muscle damage,” *J. Strength Cond. Res.*, vol. 21, no. 3, pp. 678–684, 2007.
- [81] S. L. Halson, G. I. Lancaster, J. Achten, M. Gleeson, and A. E. Jeukendrup, “Effects of carbohydrate supplementation on performance and carbohydrate oxidation after



- intensified cycling training,” *J. Appl. Physiol.*, vol. 97, no. 4, pp. 1245–1253, 2004.
- [82] A. E. Jeukendrup, “Periodized Nutrition for Athletes,” *Sport. Med.*, vol. 47, no. s1, pp. 51–63, 2017.