

Article

Nuevo Análisis de las Dietas Altas en Grasas para el Rendimiento Deportivo: ¿Pusimos el “Último Clavo en el Ataúd” Demasiado Pronto?

Louise M. Burke^{1,2}¹*Sports Nutrition, Australian Institute of Sport, Canberra, ACT, Australia*²*Mary MacKillop Institute for Health Research, Australian Catholic University, Melbourne, VIC, Australia*

RESUMEN

Durante el período 1985-2005, los estudios analizaron la hipótesis que la adaptación a una dieta baja en carbohidratos (<25% energía), alta en grasas (>60% energía) (LCHF) para aumentar la utilización muscular de grasas durante el ejercicio, podría mejorar el rendimiento en individuos entrenados a través de la reducción de la dependencia en el glucógeno muscular. Tan poco como 5 días de entrenamiento con LCHF reorganizan al músculo para que recupere la capacidad de quemar grasas produciendo cambios robustos que persisten a pesar de las estrategias agudas para restaurar la disponibilidad de carbohidratos (por ejemplo, supercompensación de glucógeno, ingesta de carbohidratos durante el ejercicio). Además, una exposición de 2 a 3 semanas a una ingesta mínima de carbohidratos (<20 g/día) permite la adaptación a concentraciones sanguíneas elevadas de cetonas. Sin embargo, el fracaso para detectar beneficios claros sobre el rendimiento durante protocolos de resistencia/ ultra resistencia, junto con evidencia de perjuicio sobre el rendimiento en ejercicios de alta intensidad provocados por la regulación hacia la baja del metabolismo de carbohidratos, llevó a este autor a evitar que los atletas competitivos de deportes convencionales utilicen estas estrategias de adaptación a las grasas. La reciente reaparición del interés por las dietas LCHF, junto con anécdotas de mejoras de rendimiento por parte de deportistas que las siguen, ha creado la necesidad de revisar los potenciales beneficios de este estilo de alimentación. Lamentablemente, la ausencia de nuevos datos evita el planteo de una conclusión diferente. Sin perjuicio de los resultados de las investigaciones futuras, existe la necesidad de un mejor reconocimiento de las pautas de nutrición deportiva actuales que promueven un enfoque individualizado y periodizado sobre la disponibilidad de alimentos durante el entrenamiento, lo que le permite al atleta prepararse para el rendimiento en las competencias con flexibilidad metabólica y poder hacer un uso óptimo de todos los sustratos musculares. No obstante puede haber ciertos contextos donde las dietas LCHF son beneficiosas, o por lo menos no son perjudiciales para el rendimiento en los deportes.

INTRODUCCION

En 2006, después de aprox.15 años de esfuerzos fallidos por aprovechar las adaptaciones a una dieta alta en grasa como

una estrategia ergogénica para el rendimiento deportivo en competidores altamente entrenados, este autor y un colega fueron invitados a realizar un comentario sobre la publicación de un nuevo estudio realizado en la Universidad de Ciudad del Cabo, [1]. Después de una inspección cuidadosa del paper, nosotros especulamos sobre su rol como “otro clavo en el ataúd” en el tema de la adaptación a las grasas sobre rendimiento deportivo [2]. Nosotros escribimos sobre lo que hasta ahora se conoce como dieta baja en carbohidratos, alta en grasas (LCHF), “... parecería que estamos cerca de cerrar la puerta a una aplicación de este protocolo dietético. Los científicos pueden seguir interesados en la respuesta del cuerpo a los diferentes estímulos dietéticos, y pueden descubrir los mecanismos que sostienen los cambios observados en el metabolismo y en el funcionamiento. Sin embargo, quienes trabajan en la nutrición deportiva pueden eliminar las dietas de “carga de grasa” y las dietas altas en grasas de su lista de ayudas ergogénicas genuinas para los deportes de resistencia y ultra resistencia por lo menos para los eventos convencionales dentro de estas categorías ” [2].

Una década después, las teorías y las afirmaciones que la adaptación a las grasas puede mejorar el rendimiento deportivo ha re-surgido fuertemente en varias fuentes a través de bibliografía revisada por pares [3-6], publicaciones laicas [7], y una red de información altamente desarrollada que no existía durante la encarnación previa de esta teoría alimentaria: las redes sociales [8, 9]. Debido al número y fervor de las discusiones y de la rapidez/alcance de la información esparcida entre los círculos científicos y atléticos, tenemos la necesidad de revisar la propuesta que una dieta LCHF mejora el rendimiento deportivo de los atletas competitivos. Esta revisión resume la teoría y la evidencia que apoya el uso de las dietas LCHF para el rendimiento atlético. Revisaremos los datos experimentales que permitieron plantear las conclusiones obtenidas por este autor en 2006 y el contexto de deporte competitivo en el cual se aplican. Enfrentaremos los planteos actuales sobre la dieta LCHF y rendimiento deportivo contra las pautas de nutrición deportiva actuales y con cualquier otra evidencia adicional contra la cual deban ser contrastados. Finalmente, proporcionaremos un juicio sobre si hay justificación para recomendar la dieta LCHF para el rendimiento deportivo, en general o en escenarios específicos, y las investigaciones que deberían ser realizadas para continuar desarrollando las pautas para una dieta óptima de entrenamiento/competición. Para aportar objetividad a la discusión sobre la promoción actual de la dieta LCHF para mejorar el rendimiento deportivo, aportaremos las citas de importantes defensores tomadas de la bibliografía revisada por pares y de fuentes menos formales. Aunque la inclusión de las últimas fuentes en una revisión científica puede ser considerada no convencional, reconocemos que en la actualidad muchos científicos usan las redes sociales activamente para promover sus opiniones [10] e incluso para conducir investigaciones [11], aunque no utilicen metodologías tradicionales. Por consiguiente, obtendremos una fuente importante de información para las teorías que deben ser analizadas. Además, aunque el análisis de la evidencia actual se basa principalmente en literatura revisada por pares que involucra estudios científicos bien controlados en individuos entrenados [12], tendremos consideración con información anecdótica proporcionada por fuentes laicas para guiar los futuros esfuerzos de investigación o identificar escenarios en los que las dietas de LCHF parecen tener utilidad.

Rendimiento deportivo: Una Breve Apreciación Global de los Sistemas de Combustible

Aunque está fuera del alcance de esta revisión resumir adecuadamente los determinantes para un entrenamiento eficaz y un rendimiento óptimo en competencias, aportaremos varios comentarios generales relacionados a las estrategias de entrenamiento y de competición para poner en contexto las discusiones de esta revisión. Los eventos deportivos tienen una duración que va desde segundos (por ejemplo, saltos, tiros) a semanas (por ejemplo, carrera de ciclismo del Tour de Francia), en los cuales el éxito está determinado por un complejo y a menudo cambiante rango de características, entre las que se incluyen la potencia, fuerza, resistencia, agilidad, habilidad y toma de decisiones. El rol del entrenamiento es aumentar las adaptaciones en los músculos y en otros órganos/sistemas del cuerpo para alcanzar características específicas que permitan el éxito en el evento del atleta a través de una serie de estímulos sistemáticos y periodizados que involucran la interacción entre nutrición y ejercicio [13]. Las estrategias de alimentación durante este período también deben ser periodizadas [14] en función de las demandas de la sesión y las prioridades relativas del entrenamiento de alta intensidad/calidad, practicando la nutrición para las competencias y promoviendo la respuesta adaptativa al estímulo de entrenamiento (ver Tabla 1). En la fase de competición, el principal papel de la nutrición es abordar los factores limitantes específicos que de otra manera podrían provocar fatiga o disminución en el rendimiento [15]. En muchos eventos deportivos, uno de estos factores es la capacidad que tienen las reservas de combustible corporal para apoyar la función óptima de los músculos y del sistema nervioso central (CNS).

En los músculos el ejercicio es alimentado por un sistema intrincado que integra la producción de adenosina trifosfato (ATP) originada a partir de una combinación de sustratos intra y extra celulares provenientes de vías que dependen de oxígeno (oxidación de grasas y carbohidratos) y vías que no dependen del mismo (sistema de la fosfocreatina y glucólisis anaeróbica). La contribución relativa de los diferentes sustratos a la mezcla de combustibles depende de diversos factores, entre los que se incluye el modo, la intensidad y la duración del ejercicio, el estado de entrenamiento del atleta y la ingesta alimentaria reciente y de largo plazo [16]. Para un óptimo rendimiento en competencias, el atleta necesita una adecuada combinación de reservas de combustibles en relación a las demandas del evento y también “flexibilidad metabólica”, definida en este contexto de rendimiento deportivo como la capacidad de utilizar rápida y eficientemente estas vías metabólicas con el fin de maximizar la regeneración de ATP. Aunque carecemos de datos específicos sobre el uso de las

vías metabólicas y de sustratos en la mayoría de los deportes competitivos, los adelantos tecnológicos tales como el desarrollo de potenciómetros y de unidades de sistema de posicionamiento global han permitido la recolección de información como producción de potencia, frecuencia cardíaca y patrones de movimiento que capturan indirectamente las demandas metabólicas de algunos eventos. Una importante lectura de tales datos es que las demandas de combustible de muchos deportes son complejas y a menudo son mal interpretadas. Un ejemplo de relevancia particular en esta revisión es que deportes como el ciclismo de ruta con muchas etapas, triatlones y maratones son clasificadas como eventos de resistencia y ultra resistencia realizados en las intensidades de ejercicio sub-máximas; de hecho, al menos para los atletas competitivos, el terreno, las estrategias de ritmo y los elementos tácticos en estos eventos hacen que las partes breves pero críticas de la competencia que a menudo determinan los resultados (por ejemplo, escapadas, ascensos, cambios de ritmo, los finales con sprints), se realicen a un ritmo mas alto que frecuentemente se acerca al ritmo máximo [17-19]. Además, para tales atletas, incluso el ritmo de "base" a partir del cual se realizan estos breves esfuerzos en deportes de resistencia como la maratón requiere una economía de ejercicio alta y un uso sostenido de un muy elevado porcentaje de intensidad aeróbica máxima [20]. La alimentación del cerebro y del SNC también debe ser considerada, porque el reclutamiento motor, la percepción de esfuerzo, las estrategias de ritmo, la ejecución de habilidades y la toma de decisiones también son importantes para determinar el rendimiento. En este caso, los principales sustratos son la glucosa sanguínea y las reservas de glucógeno en los astrocitos [21, 22], aunque bajo ciertas condiciones donde las concentraciones sanguíneas de cuerpos cetónicos son altas, estos pueden representar una fuente de combustible adicional [23].

Las estrategias nutricionales durante las competencias que pueden aumentar la disponibilidad de combustibles se resumen en la Tabla 1 y se incluyen las estrategias utilizadas para intentar aumentar directamente el tamaño de una reserva muscular limitada (por ejemplo, carga con creatina o carbohidratos) y otras estrategias para ahorrar el uso de las reservas limitadas por medio de un sustrato alternativo. Para los eventos con una duración superior a 1 hora, el enfoque se centra en las tácticas para aumentar la disponibilidad de carbohidratos para los músculos y para el cerebro, dado que una baja la disponibilidad de carbohidratos se asocia con fatiga a través de diversos mecanismos periféricos y centrales [24]. Las reservas de grasas del cuerpo, compuestas por triglicéridos intramusculares (IMTG), lípidos sanguíneos y por TG del tejido adiposo son un sustrato combustible relativamente abundante incluso en los atletas magros. Si bien se sabe que el entrenamiento de resistencia mejora la capacidad de un atleta para oxidar grasas durante el ejercicio [16], un grupo importante de investigaciones realizadas en las últimas 3 décadas ha analizado las maneras en que esta puede ser estimulada para mejorar adicionalmente la capacidad física y el rendimiento deportivo reduciendo la dependencia sobre las limitadas reservas musculares de glucógeno y/o la necesidad de consumir carbohidratos durante el evento. Tal como se sintetiza en la Tabla 2 y en varias revisiones [25, 26], las tácticas agudas para aumentar la disponibilidad de ácidos grasos libres a través de la ingesta de grasas en las horas o días previos al ejercicio, o del consumo de grasas durante el ejercicio han demostrado ser infructuosas o imprácticas. Por lo tanto, la atención se ha desplazado hacia tácticas crónicas que podrían reorganizar los músculos para realizar un mejor uso de las grasas como combustible para el ejercicio.

Tabla 1. Resumen de conocimiento actual y de las pautas para optimizar las necesidades de combustibles para la nutrición durante los entrenamientos y las competencias. CHO= carbohidratos; SNC= Sistema nervioso central.

Problema	Conocimientos y recomendaciones actuales		
Ingesta de CHO en la dieta de entrenamiento	<p>El enfoque previo de dietas "altas en CHO" debe ser reemplazado por la consideración de "disponibilidad de CHO", en el cual la cantidad diaria y el momento de ingesta de CHO se compara con el costo de combustible muscular del entrenamiento: "alta disponibilidad de CHO" = ingesta que aporta el combustible adecuado para cubrir las necesidades del entrenamiento, mientras que "disponibilidad baja de CHO" = la ingesta probablemente se asocia con el agotamiento de CHO [53]. La ingesta diaria de CHO no debe ser estática si no que debe ser periodizada a lo largo de los microciclos y macrociclos del entrenamiento según los costos de combustible de las cargas de entrenamiento y de la importancia de entrenar con una elevada disponibilidad de CHO [53]. Cuando los entrenamientos involucran técnicas de alta intensidad/volumen/calidad, los patrones de nutrición diaria deben aportar una elevada disponibilidad de CHO [53]. Cuando los entrenamientos involucran ejercicios de menor intensidad/calidad, es menos importante seguir patrones que permitan obtener una elevada disponibilidad de CHO [53]. El manejo deliberado de la dieta/entrenamiento para realizar ejercicio con baja disponibilidad de CHO puede favorecer la respuesta adaptativa al estímulo de entrenamiento y puede ser periodizado dentro del programa de entrenamiento según las metas y experiencia individuales [19, 54].</p>		
Problema	Estrategia	Eventos a los que era destinado	Conocimientos y lineamientos actuales
Optimización del rendimiento en competencias mediante el aumento de la disponibilidad de combustibles (especialmente para enfrentar el escenario de una limitada disponibilidad de combustible)	Aumento de las reservas musculares de fosfocreatina para mejorar la recuperación durante los periodos entre los intervalos repetidos de alta intensidad.	Deportes de detención y salida: e). Deportes de equipo, deportes con raquetas	Probablemente es efectivo en deportes/posiciones en la cual el agotamiento gradual de las reservas de fosfocreatina es limitante para los patrones de movimiento [62]. Protocolo recomendado [63]: Carga rápida: 5 días @ 20g/día de creatina en dosis separadas. Carga lenta: 30 días @ 3g/día. Mantenimiento: 3 g/día
	Aumento de las reservas musculares de glucógeno en el día(s) previo al evento: carga con CHO	Deportes prolongados continuos o intermitentes (normalmente >90 min) en los cuales se agotan las reservas de glucógeno muscular: por ejemplo, maratón, carreras de ciclismo de ruta, posiciones de medio campo en algunos juegos de equipo	Probablemente será efectivo si en el evento se agotan las reservas de glucógeno muscular, lo que provocará una reducción en la velocidad y distancia recorrida [64]. Protocolo recomendado: [53]: 36-48 h @ 10-12 g/kg/día CHO + puesta a punto
	Aumento en el glucógeno muscular/hepático en las horas previas al evento: comida pre evento	Deportes prolongados continuos o intermitentes (normalmente >45 min), sobre todo donde el glucógeno muscular/hepático pre-ejercicio no es optimizado mediante otras estrategias	Probablemente será efectivo si la ingesta aumenta la disponibilidad de CHO (aumento en el glucógeno hepático/muscular > aumento en la tasa de oxidación de CHO durante el ejercicio) sobre todo en un evento con CHO-limitados [53, 65]. Protocolo recomendado [53]: 1-4 g/kg de CHO 1-4 horas antes del evento
	Aumento en el suministro exógeno de CHO: ingesta de CHO justo antes y durante el evento. No son necesarios para efectos metabólicos en eventos con una duración mayor a aprox. 75 min, pero puede ser útil para efectos centrales en eventos con una duración mayor a aprox. 45 min.	Deportes prolongados continuos o intermitentes (normalmente >75 min), en los cuales una fuente adicional de combustible puede reemplazar/ahorrar las reservas de glucógeno musculares limitadas. Ej. Maratón, carreras de ciclismo de ruta, triatlones, deportes de equipo y de raqueta.	Probablemente es eficaz si la ingesta aporta una fuente de CHO disponibles rápidamente para el músculo, particularmente si el glucógeno muscular se agota. También puede tratar el deterioro del SNC en eventos o individuos que sufren una reducción en la concentración sanguínea de glucosa [24, 66]. Protocolo recomendado [53]: 1-2,5 h: 30-60 g/h de CHO, > 2,5-3 h: hasta 90 g/h de CHO
		Deportes continuos de alta intensidad (45-75 min) que generalmente no se consideran limitados por las reservas musculares de glucógeno, por ejemplo, pruebas contrarreloj de ciclismo, media maratón	Probablemente será efectivo para mejorar las estrategias de ritmo por medio del efecto en los "centros de recompensa" del cerebro [61, 67]. Protocolo recomendado [53]: exposición frecuente de la boca y la cavidad oral a CHO, se incluye el uso de enjuagues bucales
	Mayor disponibilidad de ácidos grasos: ayuno o dieta rica en grasas de corto plazo (1-3 días)	Deportes prolongados continuos o intermitentes (normalmente >75 min) en los que la fuente de combustible adicional puede reemplazar/ahorrar las reservas de glucógeno muscular limitadas: por ejemplo, maratón, carreras de ciclismo de ruta, triatlón, deportes de equipo y de raqueta.	Generalmente no aumenta (e incluso puede perjudicar) la capacidad/rendimiento físico porque la mayor oxidación de grasas no puede compensar las bajas reservas de glucógeno muscular. Protocolo: no recomendado [25, 26]
Incremento en la disponibilidad de ácidos grasos: comida previa al evento con elevado contenido de grasas (+heparina) o infusión de intralípidos	No existe un beneficio claro sobre el rendimiento además de la mayor oxidación de grasas. El uso de infusión de intralípidos y heparina para asegurar una elevada disponibilidad de ácidos grasos no es práctico. Protocolo: No recomendado [25, 26]		
Incremento en la disponibilidad de ácidos grasos: consumo de triglicéridos de cadena media durante el ejercicio	Tipicamente incapaz de aumentar (e incluso puede dañar) la capacidad/rendimiento físico porque la gran cantidad necesaria para afectar el metabolismo de combustibles provoca problemas intestinales [68]. Protocolo: No recomendado [25, 26]		

Adaptación Crónica a las Dietas Altas en Grasas: Investigaciones Realizadas desde 1980 hasta 2006

En contraste con la exposición a corto plazo a una dieta de LCHF, la cual reduce la capacidad física a través del agotamiento de las reservas hepáticas y musculares de glucógeno sin producir un aumento compensatorio en la oxidación de grasas [27, 28], la adhesión a largo plazo a este régimen dietético produce diferentes adaptaciones para aumentar la degradación, transporte y oxidación de grasas en el músculo esquelético [29]. Se han investigado varias metodologías diferentes.

Dietas Cetogénicas Altas en Grasas

Según las recientes revisiones [5, 6], las observaciones históricas sobre la considerable vitalidad física de los exploradores que consumían las dietas tradicionales de los Inuit casi desprovistas de carbohidratos (contribución de energía: 85% grasas, 15% proteínas) permitieron el planteo de una investigación de laboratorio que se realizó en los años ochenta sobre este fenómeno [30, 31]. En este estudio realizado por el Dr. Stephen Phinney, cuidadosamente realizado en un pabellón metabólico (*metabolic ward*), cinco ciclistas altamente entrenados fueron evaluados luego de 1 semana de una dieta rica en carbohidratos (aprox. 57% de energía) y nuevamente luego de 28 días de una dieta con restricción severa de carbohidratos pero isoenergética, con una contribución de energía proveniente en 85% de grasa y en 15% de proteínas (Tabla 2). Esta dieta se asoció con cetosis, que fue evidenciada por el aumento en la concentración sanguínea de betahidroxibutirato $<0,05$ a >1 mmol/L después de una semana y luego se mantuvo en ese rango. El ejercicio fue monitoreado por un test de ciclismo hasta el agotamiento a aprox. 63% de la capacidad aeróbica máxima (VO_{2max}) en condiciones de baja disponibilidad de carbohidratos (ayuno de toda la noche y consumo de agua durante el ejercicio) [30], y el resultado promedio fue que se mantuvo la capacidad de realizar ejercicio (ver Figura 1). A pesar de la despreciable ingesta de carbohidratos, las reservas de glucógeno muscular en reposo no se agotaron si no que se redujeron a aprox. 45% de los valores observados en la fase alta en carbohidratos (76 vs. 140 mmol/kg de peso húmedo muscular). Además, en ambas pruebas, al finalizar el ejercicio se observó agotamiento de glucógeno muscular en las fibras Tipo I con una reducción de cuatro veces en su aporte para el uso de combustibles en el grupo LCHF. El aporte de la glucosa sanguínea como combustible disminuyó tres veces, y los aportes provenientes de la gluconeogénesis a partir de glicerol liberado por la degradación de triacilglicéridos así como también de lactato, piruvato y ciertos aminoácidos evitaron la hipoglucemia durante el ejercicio y permitieron el almacenamiento de glucógeno entre las sesiones de entrenamiento. La oxidación de lípidos aumentó para recuperar el combustible para el ejercicio.

Tabla 2. Resumen de estudios sobre adaptación a la dieta cetogénica, baja en carbohidratos y alta en grasas sobre el rendimiento de individuos entrenados. *BM= Masa corporal; CHO= Carbohidratos, E= energía, HC= Dieta alta en carbohidratos, LCHF=Dieta alta en grasas y baja en carbohidratos, M=varones, NS=no significativo, TTE= Tiempo hasta el agotamiento, VO_{2max} = Consumo de oxígeno máximo.*

Atletas y diseño del estudio	Protocolo de adaptación a LCHF	Protocolo de rendimiento	Estatus nutricional/estrategias para el rendimiento	Ventaja para el rendimiento obtenida gracias a la dieta LCHF
Pre 2006 Ciclistas altamente entrenados [30] (n=5 M) Diseño cruzado con efecto de orden (dieta control primero)	7 días Dieta HC (57% CHO) y luego 28 días de dieta LCHF (grasa = 85% E, CHO = <20 g/día)	Ciclismo; TTE a 60% $\dot{V}O_{2max}$	Ayuno de toda la noche + ninguna ingesta de CHO durante el ejercicio	Ninguna Diferencia no significativa en (TTE entre los grupos (151 vs. 147 min para LCHF y HC respect.). Datos de grupo sesgados por un participante que aumentó el tiempo hasta el agotamiento un 156% en el grupo LCHF (Figura 1)
Post 2006 Ciclistas <i>off road</i> moderadamente entrenados [49] (n=8 M) Diseño cruzado	28 días HC (CHO=50% E) LCHF (grasa = 70% E, CHO= 15%) Verdaderamente cetogénica	Ciclismo; test de $\dot{V}O_{2max}$	No establecido	Ninguna Resultados mixtos, con aumento pequeño en $\dot{V}O_{2max}$ (56 vs. 59.2 ml/kg/min para HC y LCHF respect., $p < 0,01$) pero reducción en la carga de trabajo máxima (350 vs. 362 W, $p = 0,037$). Cambio favorable pequeño en la composición corporal con LCHF (pérdida de ~ 1,8 kg con pérdida de grasa corporal de 14,9 a 11,0% de BM, $p < 0,01$)
Deportistas elite de gimnasia artística [50] (n= 8 M)	30 días HC (CHO=47% E, 3,9 g/kg) luego 30 días de dieta LCHF (grasa= 55% E, CHO <25 g/día) (proteína =40%E+suplementos agregados)	Ejercicios de fuerza: saltos desde sentadillas, salto contramovimiento, lagartijas, dominadas, test leg closed barrier maximo	No establecido	Ninguna No se observaron cambios en las mediciones de fuerza en ninguna fase alimentaria, por lo tanto no se observaron disminuciones en las mediciones de rendimiento con la dieta LCHF. Se observó un pequeño cambio favorable en la composición corporal con la dieta LCHF (pérdida de ~ 1,5 kg con una pérdida de grasa corporal de 7,6 a 5,4% BM)

Las conclusiones de los investigadores sobre los resultados de su estudio fueron que "la adaptación metabólica para limitar la oxidación de CHO (carbohidratos) puede facilitar el ejercicio submáximo moderado durante la cetosis hasta el punto en que se vuelve comparable a la observada después de una dieta rica en CHO". Además, destacaron que "debido a que las reservas de glucógeno requieren muchos días para su recuperación, mientras que incluso los individuos muy delgados

mantienen reservas calóricas apreciables en forma de grasas, existe un beneficio potencial en este estado de adaptación a las cetonas para los atletas que participan en ejercicios de resistencia prolongados durante dos o más días". Sin embargo, los autores también hicieron un comentario sobre los resultados de tests de VO_{2max} realizados durante cada etapa alimentaria con respecto a la dieta cetogénica: "... el precio pagado por la conservación de los CHO durante el ejercicio parece ser una limitación para la intensidad de ejercicio que puede ser utilizada... existe una marcada atenuación del valor del cociente respiratorio [RQ] en el VO_{2max} que sugiere una restricción severa en la capacidad de los sujetos para realizar trabajo anaeróbico ". Su explicación para esta observación fue que "el factor de control no sería la presencia o ausencia de sustrato en la fibra. Si no que lo mas probable sería una restricción en la movilización des sustrato o el reclutamiento de las fibras. El resultado, en cualquier caso, es un entorpecimiento de la función cerca del VO_{2max} ".

Los investigadores tenían en claro que su dieta cetogénica no mejoraba la capacidad física/rendimiento, como se creía popularmente y señalaron que, como mucho, la resistencia en intensidades submáximas se mantenía a expensas de la capacidad de realizar ejercicio de alta intensidad. Sin embargo, el examen del diseño y de los resultados debe ser realizado con cautela. Aunque en este estudio se logró un control dietético excelente, se proporcionaron pocos detalles de los protocolos de entrenamiento que utilizaron los ciclistas. Es curioso en función del efecto de orden en el diseño del estudio (todos los sujetos realizaron la prueba con la dieta cetogénica 4 semanas después de la prueba de la dieta con carbohidratos), que no se haya observado ningún beneficio en la capacidad de realizar ejercicio derivado de un período de entrenamiento adicional. Además, es necesario reconocer que la tarea de ejercicio se realizó bajo condiciones que podrían haber favorecido alguna ventaja de la adaptación a la baja disponibilidad de carbohidratos (ejercicio de intensidad moderada, ayuno de toda la noche, ninguna ingesta de carbohidratos durante el ejercicio). Sin embargo, y lo más importante, es que el haberse centrado en los resultados medios de las pruebas en un tamaño de muestra pequeño esconde las experiencias individuales de los ciclistas. Tal como se observa en la Figura 1, las interpretaciones publicadas de los resultados de este estudio están principalmente sesgadas por la experiencia de un solo sujeto que presentó una mejora grande en la capacidad de ejercicio después de la dieta cetogénica (y del período de entrenamiento adicional). De hecho, el análisis estadístico de los mismos datos utilizando una metodología de inferencia basada en la magnitud [32] reveló un resultado incierto, donde las oportunidades de un resultado sustancialmente positivo, trivial y sustancialmente negativo fueron 32, 32, y 36%, respectivamente (Stellingwerff, comunicación personal).

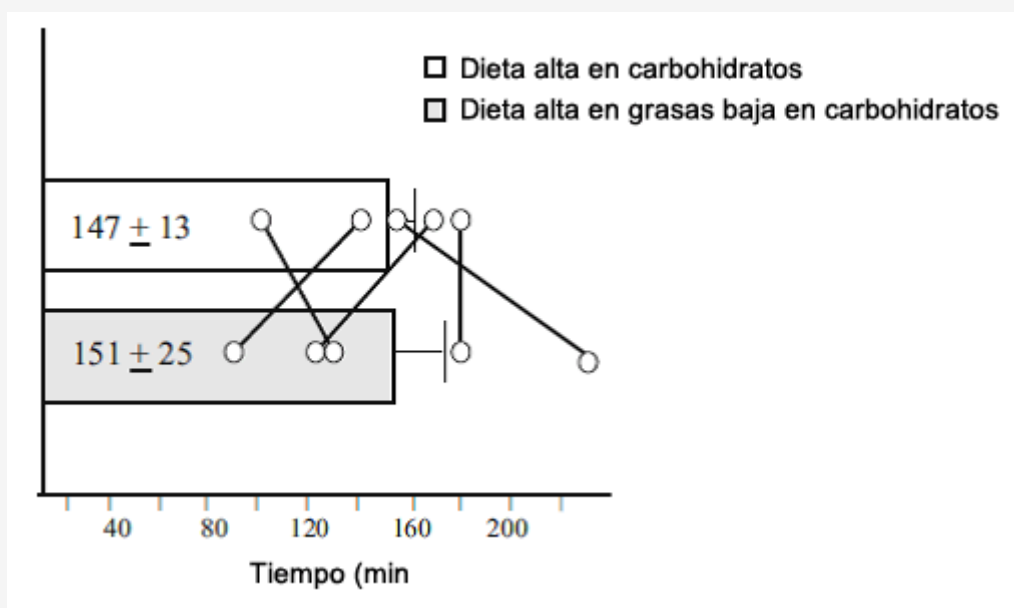


Figura 1. Capacidad de realizar ejercicio (tiempo hasta el agotamiento a 62-64% de la capacidad aeróbica máxima, equivalente a aprox. 185 W después de 7 días de dieta alta en carbohidratos seguida por 28 días de dieta alta en grasas y baja en carbohidratos. Los datos se presentan en forma de media \pm error estándar de la media de cinco ciclistas altamente entrenados (no significativamente diferentes), donde los puntos de los datos individuales están representados por O. Extraído y modificado de Phinney et al. [30]

Dietas Altas en Grasas no Cetogénicas

Se han realizado varios estudios en individuos entrenados que involucraron la exposición durante un tiempo mayor o igual a 7 días a una dieta rica en grasas y restringida en carbohidratos sin que se produzca cetosis [33-37]; la mayor parte de

este trabajo fue dirigido por el Dr. Vicki Lambert y el Profesor Tim Noakes de la Universidad de Ciudad del Cabo. Dos estudios en los cuales se manejó la ingesta de carbohidratos y grasas en poblaciones entrenadas no fueron incluidos en este resumen porque los cambios alimentarios no fueron suficientes para cumplir con el criterio de ingesta de grasa >60% o ingesta de carbohidratos <25% [38, 39]. La literatura resumida (Tabla 3) incluye un estudio que se enfocó en la valoración del contenido de carbohidratos de la dieta de ciclistas mujeres modestamente entrenadas [33] y cuatro estudios que fueron diseñados específicamente para que los sujetos se adaptaran a una dieta rica en grasas [34-37], aunque en un caso, el bajo grado de restricción de carbohidratos no permitió crear diferencias claras en el contenido de glucógeno muscular entre los tratamientos [37]. Nuevamente, las dietas proporcionadas dentro de los estudios eran isoenergéticas y buscaban mantener el equilibrio de energía.

En el caso de los estudios específicamente enfocados en adaptar a los atletas a una alta ingesta de grasas, la razón de aumentar la grasa alimentaria era aumentar las reservas de IMTG [37], restringir los carbohidratos para reducir el contenido de glucógeno muscular [34-36] y permitir una exposición suficiente para que se produzcan las adaptaciones que permiten la restructuración muscular con el fin de alterar los patrones de utilización de combustibles durante el ejercicio y compensar la alteración en la disponibilidad de combustibles [34-37]. Se eligió evitar la cetosis para quitar su efecto de confusión en la relación entre la tasa de intercambio respiratorio y la utilización de sustratos durante el ejercicio, evitando así una verdadera medición de los cambios en la oxidación de carbohidratos y de grasas durante el ejercicio [34]. Un rango de respuestas adaptativas a la dieta LCHF se observó o confirmó en los individuos entrenados.

Tal como se resume en la Tabla 3, se evaluó el efecto de la exposición a la dieta LCHF en la capacidad/rendimiento físico en un rango de diferentes escenarios de ejercicio y de estrategias de alimentación. Esto incluyó una serie de protocolos de ejercicio realizados secuencialmente [34] o dentro de una sola tarea de ejercicio [36], así como también estrategias alimentarias que, o aumentarían adicionalmente la disponibilidad de grasas [33, 36, 37], aumentarían la disponibilidad de carbohidratos [35-37] o deliberadamente disminuirían la disponibilidad de carbohidratos en contra de las recomendaciones actuales o prácticas comunes [34]. En algunos casos, las diferentes estrategias alimentarias se llevaron a cabo antes y durante los protocolos de ejercicio en los grupos que consumieron la dieta alta en carbohidratos y la dieta LCHF, lo que dificultó el aislamiento de los efectos de la adaptación a las grasas *per se* [36, 37]. Esta variabilidad en el diseño del estudio hace difícil que se pueda hacer una valoración única y abarcadora del efecto de LCHF en el ejercicio, tal como se desea popularmente. Teóricamente, sin embargo, nos ofrece la oportunidad de identificar condiciones bajo las cuales la adaptación a una dieta rica en grasas puede ser beneficiosa o perjudicial para el rendimiento deportivo. Lamentablemente, el número pequeño de estudios y los tamaños de muestra pequeños en la literatura disponible no permiten que esta oportunidad sea explotada totalmente. Las consecuencias de estos estudios fueron incorporadas en el resumen al final de esta sección. Mientras tanto, ponemos atención en dos importantes observaciones obtenidas a partir de este cuerpo de literatura:

1. La evidencia de una menor utilización del glucógeno muscular como combustible de ejercicio luego de la adaptación a una dieta LCHF no puede ser considerada como un verdadero ahorro de glucógeno porque las observaciones están influenciadas por las bajas concentraciones de glucógeno en reposo, las cuales se sabe que reducen el uso del glucógeno *per se* [40]. Sólo los escenarios en los cuales se emparejan las concentraciones de glucógeno muscular antes del ejercicio pueden permitir la medición del efecto específico de adaptación a grasas en la utilización del glucógeno muscular como combustible para el ejercicio.

2. El período necesario para una adaptación a la dieta LCHF no cetogénica es más corto que lo que previamente se ha considerado. Según el estudio de evolución en el tiempo de Goedecke et al. [35], en el cual se rastreó la utilización de combustible muscular después de 5, 10 y 15 días de exposición a una dieta LCHF, el cambio sustancial para aumentar la oxidación de grasas y reducir la utilización de carbohidratos se alcanzó en 5 días y no se observó aumento a partir de allí. Por supuesto, debemos señalar que un cambio en la tasa de intercambio respiratorio durante el ejercicio, que provoca un cambio en la utilización de sustratos puede reflejar la disponibilidad prevaeciente de sustrato mas que una verdadera adaptación en el musculo.

Tabla 3. Efecto de los 28 días de adaptación a una dieta rica en grasas y baja en carbohidratos sobre el rendimiento de individuos entrenados. BM= masa corporal, CHO= Carbohidratos, E= energía, F= mujeres, HC= dieta alta en carbohidratos, LCHF= dieta baja en carbohidratos y alta en grasas, M=varones, MCT= triglicéridos de cadena media, NS= no significativo, TT= prueba contrarreloj, TTE= tiempo hasta el agotamiento, VO_{2max} = consumo de oxígeno máximo

Atletas	Protocolo de adaptación a LCHF	Protocolo de rendimiento	Estatus nutricional/estrategias para el rendimiento	Ventaja de rendimiento con la dieta LCHF
Ciclistas moderadamente entrenados [33] (n=7 F) Diseño cruzado	7 días LCHF (grasa= 59% E, CHO = 1,2 g/kg BM) HC (CHO=6,4 g/kg BM)	Ciclismo TTE a 80% VO _{2max}	3-4 h después de la comida, sin ingesta de CHO durante el ejercicio	Ninguna De hecho, el rendimiento se deterioró con la dieta LCHF. El tiempo hasta el agotamiento se redujo 47% en el grupo LCHF
Ciclistas altamente entrenados [34] (n=5 M) Diseño cruzado	14 días LCHF (grasa= 67% E, CHO=17% E*) HC (CHO=74% E*)	Ciclismo Test de wingate de 30 s + TTE a 90% VO _{2max} + TTE a 60% VO _{2max}	Ayuno de toda la noche y no se consumieron CHO durante el ejercicio	Ninguna. Dos tests de intensidad mas alta Si: Ciclismo submáximo El tiempo hasta el agotamiento aumentó 87% en el grupo LCHF que comenzó con menores reservas de glucógeno debido al ejercicio previo.
Ciclistas altamente entrenados [35] (n= 16 M) Diseño con grupos paralelos	15 días LCHF (grasa= 69% E, CHO=2,2 g/kg BM) HC (CHO=5,5 g/kg BM)	Ciclismo 150 min a 70% de VO _{2max} +TT de 40 min. Rendimiento medido en t=0, 5 10 y 15 días.	Ingesta de MCT 1,5 h antes del evento (aprox. 14g) MCT (0,3 g/kg/h) y CHO (0,8 g/kg/h) durante el ejercicio.	Ninguna El rendimiento en TT aumentó con el tiempo en ambos grupos, como resultado del protocolo de entrenamiento. Se observaron aumentos significativos en ambos grupos en el día 10, pero no se observaron diferencias en el aumento medio entre los grupos. Hallazgo importante del estudio: las adaptaciones se alcanzaron solo después de 5 días de dieta rica en grasas
Ciclistas altamente entrenados [36] (n=7 M) Diseño cruzado	14 días LCHF (grasa=66%E, CHO=aprox. 2,4 g/kg) HC (CHO=aprox. 8,6g/kg, 70%CHO)	Ciclismo 5h incluyendo TT de 15 min+ TT de 100 km	LCHF=comida pre-evento rica en grasas HC = comida pre evento rica en CHO Ambos: 0,8 g/kg/h de CHO durante el ejercicio de ciclismo	Si: Ejercicio de intensidad submáxima Ninguna: Ejercicio de mayor intensidad. En relación a los valores iniciales: HC presentó una pequeña disminución no significativa en el rendimiento de las dos pruebas TT. LCHF presentó una mayor disminución no significativa en el rendimiento de la TT de 15 minutos y un pequeño aumento no significativo en la TT de 100 km.
Duatletas altamente entrenados [37] (n= 11 M) Diseño cruzado	5 semanas LCHF (grasa= 53% E, CHO=~3,6 g/kg) HC (CHO=~6,9 g/kg 68% CHO)	Ciclismo Protocolo incremental de 40 min + TT de 20 min a ~89% VO _{2max} Carrera (día separado) TT de 21 km al aire libre	LCHF = comida pre-evento rica en grasas HC = comida pre evento rica en CHO La ingesta antes y durante la media maratón no fue explicitada	Ninguna Producción de trabajo auto-seleccionada similar a la TT de ciclismo en ambos tratamientos dietéticos (298±6 vs. 297±7 W, NS) para LCHF y HC, respectivamente. El tiempo en media maratón no fue diferente entre los grupos (80 min 12s±86 s vs. 80 min 24 s±82 s, NS)

Sin embargo, otros estudios han confirmado la presencia de un cambio robusto en el uso de sustratos del músculo por la observación de alteraciones en las concentraciones o actividad de proteínas o metabolitos que regulan la disponibilidad de ácidos grasos, así como por la persistencia de una mayor oxidación de grasas ante el suministro de fuentes de carbohidratos abundantes. Esta evidencia será discutida luego.

Es importante destacar que la observación realizada a partir de esta serie de estudios, en donde la reorganización de los músculos ya entrenados para optimizar la utilización de grasas como combustible para el ejercicio puede producirse en un período convenientemente corto, que nos lleva, en parte, hacia la próxima fase de investigación en donde se realizaron esfuerzos para mejorar el rendimiento deportivo optimizando independientemente la capacidad del músculo para utilizar lípidos y carbohidratos

Adaptación a las Grasas y Recuperación de los Carbohidratos

Al no encontrar beneficios claros de la adaptación a una dieta rica en grasas sobre el rendimiento físico, la atención se centró en una táctica de periodización alimentaria en la cual la adaptación a corto plazo a una dieta LCHF iba seguida por la recuperación de glucógeno ("carga con carbohidratos") con 1-3 días de una dieta rica en carbohidratos con [1, 36, 41-44] o sin [45] ingesta adicional de carbohidratos antes y durante el ejercicio subsiguiente. Estas estrategias buscaban promover aumentos simultáneos en la disponibilidad y utilización de grasas y carbohidratos durante el ejercicio. De hecho, los estudios que compararon directamente la utilización de combustibles durante el ejercicio sub-máximo bajo condiciones controladas, después de un protocolo de adaptación a las grasas y luego nuevamente después de las prácticas de recuperación de carbohidratos [41, 42, 45] demostraron que la reorganización muscular era lo suficientemente sólida como para mantener un aumento en la utilización de grasas durante el ejercicio ante las prácticas que aportaban una amplia disponibilidad de carbohidratos (Figura 2).

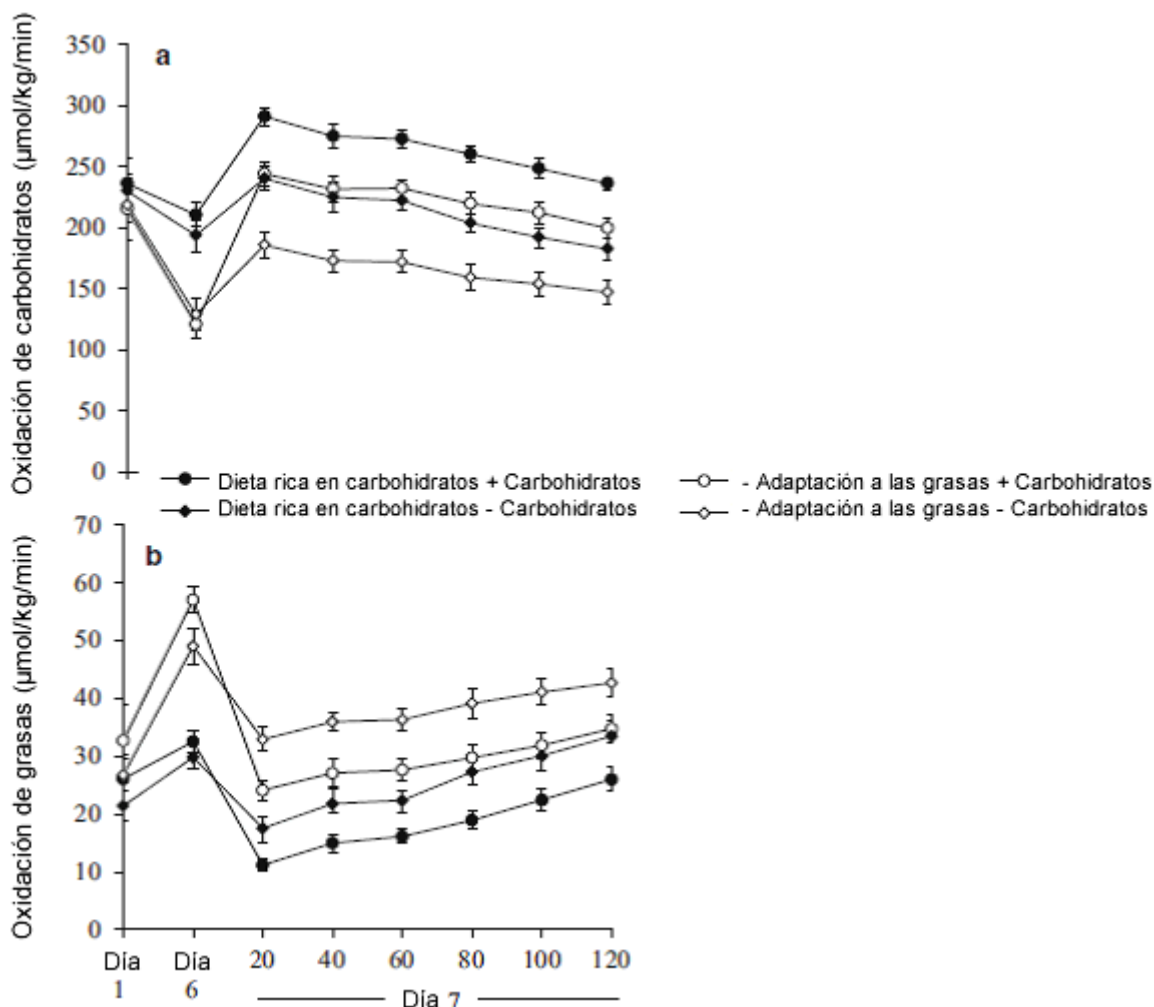


Figura 2. Efecto de 5 días de adaptación a una dieta rica en grasas y baja en carbohidratos y 1 día de una dieta rica en carbohidratos

para recuperar el glucógeno muscular (adaptación a las grasas) sobre la tasa de oxidación de carbohidratos (a) y tasa de oxidación grasas (b) durante un ejercicio de ciclismo a 70% de la capacidad aeróbica máxima en comparación con el grupo control (6 días de una dieta rica en carbohidratos). Los datos fueron extraídos de dos estudios en los cuales no se consumió ningún carbohidrato adicional el día que se realizó el ejercicio de ciclismo de 120-min con la misma carga de trabajo (-carbohidrato) [45] o donde se consumió un carbohidrato antes y durante el ejercicio de ciclismo de 120-min (+carbohidrato) [41]. Los valores se expresan en forma de Media \pm SEM para los ocho ciclistas altamente entrenados el día 1 (línea de base), día 6 (después de 5 días de dieta alta en grasa y baja en carbohidratos o 5 días de dieta alta en carbohidratos) y durante 120 min de ciclismo en estado estable el día 7 (luego de 1 día de dieta alta en carbohidratos). La adaptación a 5 días de dieta alta en grasas aumentó la utilización de grasas y disminuyó la utilización de carbohidratos durante el ejercicio sub-máximo, y se mantuvo a pesar de la recuperación del glucógeno muscular en el día 6 o de la ingesta adicional de carbohidratos antes/durante el ejercicio en el día 7. Extraído y reproducido con autorización de Burke et al. [41].

Tal como discutimos en la sección anterior, un rango de cambios y combinaciones de estrategias alimentarias y protocolos de ejercicio pueden ser investigados junto con la adaptación a las grasas y la recuperación de carbohidratos para probar el efecto de periodización alimentaria en la capacidad/rendimiento físico. La literatura disponible se resume en la Tabla 4 e incluye varios estudios realizados en el laboratorio del propio autor así como también estudios realizados en la Universidad de Ciudad del Cabo. Sin embargo, dentro de este grupo de investigaciones, un solo estudio publicado [1] intentó investigar una prueba de ejercicio que se asemejara realmente a una competencia deportiva; sus características incluyeron un único enfoque sobre el rendimiento en lugar de una mezcla entre metabolismo y rendimiento, selección del propio ritmo, y un protocolo de etapas intercaladas de ejercicios de alta intensidad contra un fondo de trabajo de moderada intensidad para reflejar el perfil estocástico de muchos eventos de la vida real. Este estudio [1] que provocó la nota editorial de 2006 retomada en esta revisión, merece una reflexión especial antes de que realicemos un resumen general de la literatura.

Havemann et al. [1] realizaron un estudio con ciclistas altamente entrenados que realizaron o una dieta LCHF de 6 días seguida por un 1 día de dieta alta en carbohidratos o 7 días de dieta alta en carbohidratos antes de realizar un protocolo de ciclismo en laboratorio diseñado para evaluar algunas de las variables de los eventos deportivos de resistencia. Específicamente, se solicitó a los ciclistas que realizaran una serie de esprints durante la prueba contrarreloj de 100 km con ritmo auto-seleccionado: esprints de 4-km realizados a aprox. 78-84% de producción de potencia máxima y esprint de 1-km realizado a >90% de la producción de potencia máxima (ver Figura 3). A nivel general, las diferencias en los tiempos de rendimiento para la prueba contrarreloj (TT) de 100-km no fueron estadísticamente significativas, aunque el rendimiento medio en el grupo de dieta alta en carbohidratos fue 3 min y 44 s o aprox. 2,5% más rápido (153 min, 10 s para el grupo de dieta alta en carbohidratos y 156 min, 53 s para el grupo LCHF, $p = 0,23$). Aunque no se observó ninguna diferencia entre los grupos en los tiempos de esprint de 4-km, el rendimiento en el esprint de 1-km fue significativamente perjudicado en el grupo LCHF en todos los sujetos, incluso en los tres sujetos cuyo rendimiento global en la TT de 100-km fue más rápido que en su prueba con elevado contenido de carbohidratos. Los autores declararon que aunque la adaptación a la dieta LCHF seguida por la recuperación de carbohidratos aumentó la oxidación de grasas durante el ejercicio, " redujo la potencia de rendimiento en esprint de alta intensidad, que estaba asociada que con mayores valores de reclutamiento muscular, percepción de esfuerzo y frecuencia cardíaca ".

Tabla 4. Efecto de adaptación a la dieta alta en grasas y baja en carbohidratos (5-10 días) seguida por una recuperación de carbohidratos en individuos entrenados. Todos los valores se expresan en forma de media \pm error estándar. BM= masa corporal; CHO= carbohidratos, IC intervalo de confianza, E =energía, HC= dieta alta en carbohidratos, = dieta baja en carbohidratos y alta en grasas, M=varones, MCT= triglicéridos de cadena media, NS= ausencia de diferencias significativas, PPO=producción de potencia máxima, TT= prueba contrarreloj, VO_{2max} = consumo de oxígeno máximo

Características de los participante	Protocolo de adaptación a LCHF	Recuperación de CHO	Protocolo de rendimiento	Estatus / estrategias nutricionales para el rendimiento	Ventaja de rendimiento con la adaptación LCHF + recuperación de CHO
Ciclistas/triatletas altamente entrenados [45] (n=8 M) Diseño cruzado	5 días Adaptados a LCHF (grasa=68% E, CHO=18% E, 2,5 g/kg BM) o HC (CHO=74% E, 9,6 g/kg BM de CHO)	1 día de descanso + elevados CHO (CHO=75%; E 10 g/kg BM)	Ciclismo. 120 min a 70% de VO ₂ max + TT de aprox. 30 min (tiempo hasta completar 7 J/kg BM)	Ayuno + ninguna ingesta de CHO durante el ejercicio	Tal vez para los individuos. Dos participantes tuvieron un mal rendimiento con la dieta HC, probablemente debido a hipoglucemia. La glucosa plasmática se mantuvo mejor en el grupo adaptado a LCHF. La prueba TT no fue significativamente diferente entre los grupos: 30,73±1,12 vs. 34,17±2,62 min para LCHF y HC respectivamente. Sin embargo, se observó una diferencia media en TT = mejora de 8% en el grupo LCHF (p=0,21, NS; 95% IC -6 a 21).
Ciclistas altamente entrenados y triatletas [41] (n=8 M) Diseño cruzado	5 días Adaptados a LCHF (grasa=68% E, CHO=18% E, 2,5 g/kg BM) o HC (CHO=70% E, 9,3 g/kg BM CHO)	1 día de descanso + alto CHO (CHO=75% E, 10 g/kg BM)	Ciclismo 120 min a 70% VO ₂ max + TT de ~ 30 min (tiempo para completar 7 J/kg BM)	Ingesta de CHO 2 h antes del ejercicio (2 g/kg BM) y durante el ejercicio (0,8 g/kg/h)	Ninguna. La glucosa plasmática se mantuvo en ambos grupos debido a la ingesta de CHO durante el ejercicio. La diferencia en TT entre los grupos fue trivial: Adaptados a LCHF=25,53±0,67 min; HC=25,45±0,96 min (p=0,86, NS). Diferencia media en TT = 0,7% de disminución en el grupo adaptado a LCHF (95% IC -1,7 a 0,4)
Ciclistas altamente entrenados y triatletas [42] (n=7 M) Diseño cruzado	6 días Adaptados LCHF (grasa=69% E, CHO = 16% E, 2,5 g/kg BM) o HC (CHO=75% E, 11 g/kg BM)	1 día Descanso + dieta alta en CHO (CHO=75% E, 11g/kg BM)	Ciclismo 240 min a 65% de VO ₂ max + TT de 60 min (distancia en 1h).	Ingesta de CHO antes del ejercicio (3 g/kg BM) y durante el ejercicio (1,3 g/kg/h)	Ninguna o tal vez para los individuos. Rendimiento de TT NS entre los grupos: 44,25±0,9 vs. 42,1±1,2 km para el grupo adaptado a la dieta LCHF y grupo HC respectivamente. Sin embargo, diferencia media en el rendimiento de TT = aumento de 4% con la dieta de adaptación a LCHF (p=0,11, NS) (95% IC -3 a 11)
Ciclistas altamente entrenados y triatletas [43] (n=5 M) Diseño cruzado	5 días Adaptados a LCHF (grasa=69% E, CHO=16% E, 2,5 g/kg BM) o HC (CHO=75% E, 11 g/kg BM)	1 día Descanso + dieta alta en CHO (CHO=75% E, 11 g/kg BM)	Ciclismo 240 min a 65% de VO ₂ max + TT de 60 min (distancia en 1h)	Ingesta de CHO antes del ejercicio (3g/kg BM) y durante el ejercicio (1,3 g/kg/h)	Ninguna. Se incorporaron seis sujetos adicionales para evaluar el error de Tipo 1 del estudio anterior [42]. No se observaron diferencias significativas en el rendimiento de TT entre los grupos: 42,92±1,46 vs. 42,94±1,41 km para el grupo de dieta LCHF y grupo de dieta HC (p=0,98). Diferencia de rendimiento = 0,02 km o 0,1%
Ciclistas altamente entrenados y triatletas [44] (n=5 M) Diseño cruzado	10 días Adaptados a LCHF (grasa=65% E, CHO=15% E, 1,6 g/kg BM) o HC (CHO=53% E, 5,8 g/kg BM)	3 días de dieta alta en CHO (CHO= 65% E, 7g/kg BM) + 1 día de descanso	Ciclismo 150 min de ciclismo a 70% del VO ₂ max + TT de 20 km (aprox. 30 min.)	Ingesta de MCT 1 hora antes del evento (aprox. 14g); MCT (0,3 g/kg/h) y CHO (0,8 g/kg/h) durante el ejercicio.	Si. Diferencia en el rendimiento de TT = aumento del 4% en la dieta LCHF: 29,35±1,25 vs. 30,68±1,55 min para la dieta LCHF y HC respectivamente (p<0,05)
Ciclistas altamente entrenados [36] (n=7 M) Diseño cruzado	11,5 días Adaptados a LCHF (aprox. 2,4 g/kg, 15 % CHO; 66 % grasa) o HC (CHO=aprox. 8,6 g/kg, 70 % E)	2,5 días dieta alta en CHO (6,8 g/kg BM)	Ciclismo Protocolo de 5 horas que incluyó una prueba TT de 15 minutos + TT de 100 km	HC: Alta en CHO comida pre evento. Ambas: 0,8 g/kg/h CHO durante el ejercicio	Tal vez. Ejercicio de intensidad sub máxima. Ninguna. Ejercicios de intensidad mas alta. En relación a las mediciones efectuadas al comienzo: El grupo HC presentó una pequeña disminución no significativa en el rendimiento en ambas pruebas TT (15 min y 100 km). El grupo adaptado a la dieta LCHF no presentó cambios en la prueba TT de 15 min pero presentó un pequeño aumento no significativo en la TT de 100 km.
Ciclistas bien entrenados [1] (n=8 M) Diseño cruzado	6 días Adaptados a la dieta LCHF (grasa = 68 % E, CHO=17 % E, 1,8 g/kg BM) o HC (CHO=68 % E, 7,5 g/kg BM)	1 día Descanso + dieta alta en CHO (8-10 g/kg)	Ciclismo TT de 100 km que incluyó 4 esprints x 4-km + 5 esprints de 1km	Consumo de CHO durante la carrera	Ninguna. De hecho, se observaron mejoras en el rendimiento de los esprints de 1 km. Diferencias entre las pruebas TT de 100 km: No significativas (156 min 54 s vs. 153 min 10 s para el grupo adaptado a LCHF contra el grupo HC). Diferencia entre la producción de potencia durante el esprint de 4 km: NS. Sin embargo, la potencia durante el esprint de 1 km (realizado a >90% PPO) se redujo significativamente en el grupo LCHF

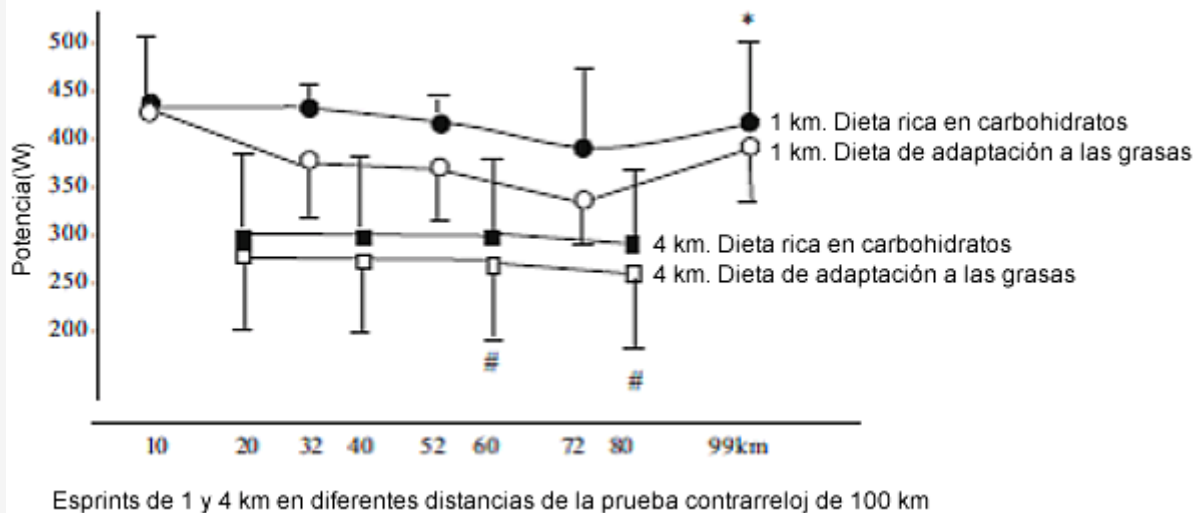


Figura 3. Producción de potencia durante los sprints de 1 y 4 km realizados dentro de una prueba contrarreloj de ciclismo (TT) de 100-km realizada a un ritmo auto seleccionado después de una dieta rica en carbohidratos de 6-días y 5 días de una dieta rica en grasas y baja en carbohidratos seguida por 1 día de una dieta rica en carbohidratos (adaptación a las grasas) [1]. Tiempo total en 100-km: 153:10 vs. 156:54 min para la dieta de adaptación a carbohidratos contra la dieta de adaptación a las grasas, no se observaron diferencias significativas. Los valores se expresan en forma de media \pm desviación estándar para ocho ciclistas altamente entrenados. La producción de potencia disminuyó con el tiempo en ambos grupos en el sprint de 4-km ($\#p<0.05$), pero no fue diferente entre los grupos. Sin embargo, en el sprint de 1-km, la potencia media fue significativamente menor después del tratamiento de adaptación a las grasas (adaptación a las grasas) en comparación con la dieta rica en carbohidratos ($*p<0.05$). Datos extraídos y reproducidos con autorización de Havemann et al. [1].

Aunque los mecanismos que perjudicaron el rendimiento en este estudio no están claros, los autores plantearon especulaciones como "mayor activación simpática, o alteraciones en la función contráctil y/o incapacidad para oxidar los carbohidratos disponibles durante los sprints de alta intensidad". De hecho, la evidencia para esta última sugerencia provino de datos del propio laboratorio de este autor recolectados contemporáneamente. En una investigación sobre los posibles mecanismos para explicar los resultados de rendimiento asociados con el modelo de adaptación a LCHF y recuperación de carbohidratos, analizamos el metabolismo muscular en reposo, durante ejercicio submáximo y después de un sprint máximo de 1 min siguiendo el tratamiento alimentario usual (Figura 4) [46]. En comparación con el grupo control (dieta rica en carbohidratos), observamos que la adaptación a la dieta LCHF y la recuperación posterior del glucógeno muscular se asoció con una reducción en la glucogenolisis durante el ejercicio y con una reducción en la forma activa de la piruvato deshidrogenasa (PDHa) en reposo, durante el ciclismo submáximo y durante el sprint de ciclismo. Las explicaciones para la disminución en la actividad de este complejo enzimático responsable de la unión entre la vía glucolítica y el ciclo del ácido cítrico incluyeron una disminución post-sprint observada en las concentraciones de adenosin monofosfato (AMP) y adenosin difosfato (ADP) libres y potencialmente la estimulación de la actividad de la PDH quinasa (PDK) que se ha observado previamente en asociación con una dieta rica en grasas [47]. Este estudio aportó evidencia de "agotamiento" de glucógeno en lugar de "ahorro" del mismo en respuesta a la adaptación a una dieta LCHF y una explicación robusta para el deterioro de aspectos fundamentales del rendimiento físico como resultado de este tratamiento alimentario.

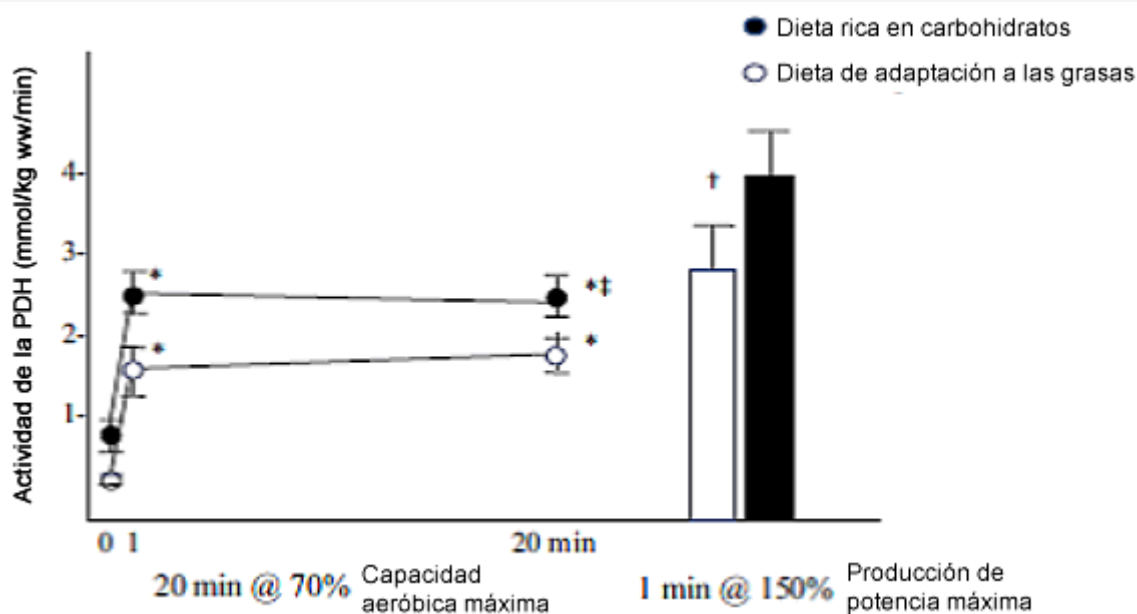


Figura 4. Actividad de la piruvato deshidrogenasa en forma activa en reposo, durante 20 min de ciclismo a aprox. 70% de la capacidad aeróbica máxima seguida por un esprint de 1-min a 150% de producción de potencia máxima después de ya sea 5-días de adaptación a una dieta rica en grasas y baja en carbohidratos seguida por una dieta rica en carbohidratos de 1-día (adaptación a las grasas) o 6 días de una dieta rica en carbohidratos. Los valores se presentan en forma de media \pm error estándar de la media para siete ciclistas altamente entrenados. * Presenta diferencia con el valor correspondiente a 0 min, † efecto del grupo: Grupo HCHO > grupo adaptado a las grasas; † punto de tiempo: Grupo HCHO > Grupo adaptado a las grasas con significancia fijada en $p < 0,05$.
Extraído y reproducido con autorización de Stellingwerff et al. [46].

Resumen de los Conocimientos Extraídos de la Literatura: 1999-2006

A continuación sintetizamos las interpretaciones más importantes realizadas por este autor de la literatura sobre la adaptación a la dieta LCHF realizadas hasta 2006:

1. La exposición a una dieta de LCHF, en ausencia de cetosis, produce adaptaciones importantes en el músculo en un tiempo tan corto como 5 días que tienen como objetivo reorganizar su capacidad de oxidar grasas como sustrato para el ejercicio. Las adaptaciones incluyen, aunque no se limitan a, un aumento en las reservas de IMTG, mayor actividad de la enzima lipasa sensible a hormonas (HSL) que moviliza los triglicéridos en el músculo y en el tejido adiposo, aumentos en las proteínas de transporte de grasas claves como el translocasa de ácidos grasos [FAT-CD36] y carnitina-palmitoil transferasa (CPT) (para una revisión más detallada, consultar el trabajo de Yeo et al. [29]). En conjunto, estas adaptaciones aumentan aún más la capacidad ya reforzada del músculo entrenado aeróbicamente para utilizar las reservas de grasa endógenas y exógenas para sostener el costo de combustible del ejercicio de intensidad moderada. Las tasas de oxidación de grasas durante el ejercicio pueden duplicarse por las estrategias de adaptación a las grasas.

2. Estas actividades de reorganización muscular estimuladas por la adaptación a las grasas son suficientemente sólidas como para mantenerse durante al menos 36 h frente a estrategias alimentarias agresivas que busquen aumentar la disponibilidad de carbohidratos durante el ejercicio (por ejemplo, supercompensación de glucógeno, ingesta de carbohidratos pre-ejercicio, altas tasas de ingesta de carbohidratos durante el ejercicio). Aunque la mayor disponibilidad de carbohidratos reduce las tasas de oxidación de grasas en comparación con la adaptación a las grasas sola, la utilización de grasas se mantiene igualmente elevada por encima de las tasas comparativas en ausencia de adaptación a las grasas. Se desconoce la evolución en el tiempo necesaria para el "washout" o pérdida de la reorganización muscular.

3. Además de la estimulación de la oxidación de grasas en reposo y durante el ejercicio, la exposición a una dieta LCHF regula hacia la baja la oxidación de carbohidratos durante el ejercicio. Técnicas directas [34, 42, 45] e indirectas [45] para medir la fuente de cambios en la utilización de sustratos demostraron que los cambios en la utilización de glucógeno muscular, y no de la glucosa sanguínea o glucosa exógena, explican el cambio en el uso de los carbohidratos. La reducción en el uso de glucógeno persiste frente a la supercompensación de glucógeno [45] y ejercicios de alta intensidad [46], lo que indica que es sólida e independiente de la disponibilidad de sustrato. Una regulación hacia la baja de la actividad de PDH explica en parte la disminución de la utilización de glucógeno como combustible para el ejercicio [46], lo que

representa una disminución en la flexibilidad metabólica.

4. A pesar de la mayor capacidad para la utilización de una fuente de combustible relativamente ilimitada como un sustrato para el ejercicio, las estrategias de adaptación a las grasas con o sin la recuperación de disponibilidad de carbohidratos no parecen mejorar la capacidad física o el rendimiento *per se*. Existen varias explicaciones interrelacionadas para explicar por qué no se observan beneficios:

*Error estadístico de tipo II: Fracaso para detectar cambios pequeños pero importantes en el rendimiento debidos a tamaños de muestra pequeños [34], respuestas individuales [42, 45] y pobre confiabilidad del protocolo de rendimiento. Aunque esta explicación a menudo parece atractiva [43], en algunos casos, una exploración extensa y tamaños muestrales mayores aumentan la confianza en verdadera ausencia de una mejora en el rendimiento [43].

*Los beneficios están limitados a escenarios específicos: las características de las condiciones bajo las cuales las estrategias de adaptación a las grasas tienen mayor probabilidad de ser beneficiosas incluyen los protocolos de ejercicio sub-máximo prolongado donde el glucógeno pre-ejercicio se agota y/o no se consumen carbohidratos durante el ejercicio (por ejemplo, disponibilidad baja de carbohidratos).

*Los beneficios están limitados a ciertos individuos: las características de los individuos que pueden responder a las estrategias de adaptación a las grasas incluyen a individuos sensibles a los carbohidratos que están sometidos a condiciones en las cuales no se puede consumir carbohidratos durante el ejercicio.

5. La experiencia de atletas, por lo menos de la exposición a corto plazo a las dietas LCHF, es que se produce una reducción en la capacidad de entrenamiento y un aumento en el esfuerzo percibido, la frecuencia cardíaca y en otras características medibles, particularmente en relación al entrenamiento de alta intensidad/calidad, el cual desempeña un rol fundamental en el programa de entrenamiento polarizado [40].

6. Las estrategias de adaptación a las grasas pueden perjudicar realmente el rendimiento físico, particularmente el relacionado a eventos de alta intensidad más cortos o etapas de alta intensidad durante un evento más largo que requiere producciones de potencia o intensidades de 85-90% del nivel máximo o por encima del mismo. Es probable que esto se deba al deterioro de la utilización de glucógeno muscular necesario para sustentar tasas de trabajo altas, incluso en aquellos escenarios donde se utilizan estrategias para alcanzar una elevada disponibilidad de carbohidratos.

Sobre la base de que los deportes competitivos convencionales generalmente brindan oportunidades para alcanzar una adecuada disponibilidad de carbohidratos, que las estrategias de adaptación a las grasas mas que aumentar, reducen la flexibilidad metabólica mediante la reducción de la disponibilidad de carbohidratos y la capacidad de usarlos eficazmente como sustratos para el ejercicio, y que los atletas serían imprudentes al sacrificar su capacidad de realizar entrenamiento de calidad superior o esfuerzos de alta intensidad durante las competencias que podrían determinar el resultado de incluso un deporte de ultraresistencia, este autor decidió abandonar la investigación y el interés práctico sobre las estrategias de adaptación a las grasas. Un meta-análisis publicado aproximadamente en el mismo momento sobre el efecto del contenido de carbohidratos y grasas en las dietas de deportistas sobre el rendimiento de resistencia [48] resumió que la heterogeneidad alrededor de sus observaciones de que las dietas altas en carbohidratos (definidas como >50% de energía proveniente de los carbohidratos) tienen un beneficio moderado (tamaño efecto=0,6) en la capacidad de realizar ejercicio en comparación con las dietas altas en grasas (definidas como >30% de la energía proveniente de las grasas) y concluyó que "es difícil plantear un respaldo concluyente a la dieta rica en carbohidratos". Sin embargo, esta heterogeneidad habla de las limitaciones de realizar un meta-análisis con un tema de semejante envergadura e indefinido, y del problema de pensar en "negro y blanco" que se discute en la conclusión de esta revisión.

Actualización en la Literatura sobre la Adaptación a las Grasas desde 2006

Dado la reciente escalada en la promoción de las dietas LCHF para el rendimiento deportivo, podríamos asumir que en la última década hemos observado la publicación de un número considerable de estudios con evidencia clara de beneficios para el rendimiento deportivo luego de la aplicación de estrategias de adaptación a las grasas. Sin embargo, para este autor, sólo dos nuevas investigaciones sobre dietas LCHF en atletas han sido publicadas en la literatura revisada por pares desde 2006 [49, 50]. En estos estudios, resumidos en la Tabla 2, no se observaron beneficios para el rendimiento asociados con una dieta LCHF cetogénica, aunque hay evidencia de una reducción pequeña pero favorable en los niveles de grasa corporal. No obstante, hay algunas particularidades en el diseño o en las metodologías de estos estudios, entre las que se incluyen el fracaso de un estudio para lograr la restricción de carbohidratos típicamente asociada con la dieta LCHF cetogénica, y no han logrado ser ampliamente citados, ni siquiera por los partidarios del movimiento LCHF. Más bien, el interés actual por la aplicación crónica de la alimentación LCHF en atletas parece estar manejado por la discusión entusiasta entre los defensores y se discute en las redes sociales (principalmente) por atletas exitosos (que no son de elite) que han experimentado con tales dietas y en diferentes intervenciones de científicos del deporte que son investigadores y defensores de éste estilo de alimentación [3-8]. No sabemos si hay una relación de causa y efecto entre estas fuentes (o la

dirección de cualquier relación), pero el fervor merece atención. En la ausencia de nuevos datos convincentes, alertamos al lector sobre diferentes elementos en las discusiones que son positivos y algunos que son preocupantes:

1. Las publicaciones revisadas entre pares de los protagonistas científicos importantes del movimiento LCHF [3, 5, 6] generalmente han presentado visiones medidas y reflexivas, basadas en una reanálisis de estudios previamente realizados, experiencias personales, observaciones anecdóticas del mundo deportivo y en un interés general para abordar los problemas de salud modernos con el enfoque de la dieta LCHF [51, 52]. En estos foros, los puntos de discusión incluyen la falta de evidencia y los resultados ambiguos de investigaciones que apoyan los beneficios de LCHF sobre el rendimiento, y también las estructuras teóricas alrededor de los beneficios potenciales para el metabolismo, el funcionamiento de los músculos y del cerebro, el estado inflamatorio y oxidativo, y el manejo de la composición corporal. La discusión generalmente contempla el potencial de que "algunos" [5] atletas responden de manera diferente a este enfoque alimentario, y afirma que este enfoque sería adecuado para "individuos", "atletas de ultraresistencia" y "atletas que realizan ejercicios de resistencia submáxima" [6] pero su uso no es aconsejable para atletas que participan en "ejercicios anaeróbicos... o en la mayoría de las condiciones de deportes competitivos" [6]. Si bien se plantean algunas sugerencias relacionadas a que un grupo más grande de atletas podría obtener beneficios al implementar la dieta LCHF, el tono general es que se necesitan investigaciones adicionales sobre estas teorías [3-6].

2. El claro planteo de tener cautela expresado en las publicaciones que tienen revisiones entre pares, generalmente no está presente en otros trabajos de los mismos autores. Los libros no profesionales [7], la información proveniente de internet y de las redes sociales [8, 9] promueven fervientemente el enfoque dietario LCHF para un grupo mayor de atletas o para los atletas en general, con una opinión positiva de que es una estrategia basada en la evidencia: "... [con respecto a los eventos de resistencia (60-80% VO_{2max}): creo que no hay duda de que una dieta baja en carbohidratos y rica en grasas es mejor. Eso es porque usted tiene suficientes reservas de grasa para correr durante horas y horas y horas. Usted no tiene suficientes reservas de carbohidratos que le permitan correr durante mucho tiempo. Muchos de los atletas de resistencia de máximo nivel han seguido la dieta baja en carbohidratos alta en grasas" [8]. Las diferencias entre estos puntos de vista pueden plantear confusiones, al igual que la tergiversación de los requisitos fisiológicos de los deportes competitivos (ver la sección 2).

3. El enfoque actual del movimiento defensor de la dieta LCHF se fundamentaría en la adaptación cetogénica, o adaptación crónica a una dieta restringida en carbohidratos (<50 g/día de carbohidratos) con elevadas ingestas de grasa (>80% de energía). Adicionalmente las características recomendadas incluyen el mantenimiento de una ingesta moderada de proteínas de aprox. 15% de energía o aprox. 1,5 g/kg/día, con la salvedad que la ingesta no debe superar el 25% de la ingesta de energía o la cetosis no se producirá, y la necesidad de asegurar una ingesta adecuada de sodio y potasio de 3-5 y 2-3 g/día, respectivamente [6]. Muchos de los beneficios teóricos de la dieta LCHF vendrían de la adaptación a elevados niveles circulantes de cuerpos cetónicos que mantienen una fuente de combustible adicional para el cerebro y los músculos, y proporcionan otros beneficios funcionales y para la salud [5, 6]. La cantidad de energía que las cetonas pueden aportar como sustrato para el ejercicio no se ha calculado ni se ha medido, lo que hace que sea imposible verificar esta afirmación. El tiempo necesario para lograr una adaptación óptima (y, por consiguiente, el período que debe ser investigado en los nuevos estudios) se supone que sería de por lo menos 2-3 semanas, con por lo menos 1 semana requerida antes de que disminuyan los sentimientos de letargo y de reducción en la capacidad física [5, 6]. Con una adaptación cetogénica crónica como esta, es innecesario consumir carbohidratos durante el ejercicio, o quizás consumirlos en cantidades pequeñas [5, 6]. Tal como se ha discutido en esta revisión, la evidencia actual para estas afirmaciones es ambigua y principalmente anecdótica. Hasta que no contemos con investigaciones adicionales, es poco probable que podamos contestar cualquiera de las preguntas y planteos actuales. El papel de dietas de LCHF no cetogénicas no está claro.

4. La literatura actual sobre las dietas LCHF es implacable con respecto a promover malas interpretaciones o información errónea sobre las pautas actuales para atletas con respecto a la ingesta de carbohidratos en las dietas fijadas para los entrenamientos o las competencias. Estas pautas se presentaron en la Tabla 1 para encuadrar las discusiones actuales, y contrastan fuertemente con la información presentada por los defensores de LCHF: "En absoluto contraste con el antiguo dogma en nutrición deportiva que enfatiza la necesidad esencial de CHO en todas las formas de ejercicio sin tener en cuenta la duración ni la intensidad..." [5]. " Los científicos del ejercicio enseñan que debido a que la utilización de glucógeno muscular se produce en elevadas tasas (durante el ejercicio de alta-intensidad en los atletas adaptados a CHO), es aconsejable que todos los atletas ingieran cantidades grandes de CHO antes y durante el ejercicio " [3]. Como colaborador en la evolución de las pautas de nutrición deportiva actuales que han abarcado desde un enfoque universal hasta todos los aspectos de la dieta del atleta, con el fin particular de promover un enfoque individualizado y periodizado tanto para la ingesta de carbohidratos como para la disponibilidad de los mismos durante la fase de entrenamiento [53], este autor encuentra que tal tergiversación es una expresión decepcionante.

Resumen y Direcciones Futuras

Sería beneficioso para la nutrición deportiva que investigadores y practicantes demostraran respeto mutuo en el reconocimiento de la evolución de nuevas ideas y en el reemplazo de pautas viejas por nuevas recomendaciones [53]. De hecho, los practicantes de nutrición deportiva modernos enseñan a los atletas a manejar sus prácticas de alimentación para evitar ingestas innecesarias y excesivas de carbohidratos *per se*, para optimizar los resultados de entrenamiento a través de la modificación del momento de consumo (*timing*), la cantidad y el tipo de alimentos y bebidas ricos en carbohidratos para equilibrar los períodos de baja y alta disponibilidad de carbohidratos, y para adoptar estrategias de competición comprobadas que aporten una disponibilidad adecuada de carbohidratos según las necesidades y oportunidades proporcionadas por el evento y la experiencia del individuo [14, 54-57]. Es importante considerar las visiones de las investigaciones y los testimonios de los atletas para identificar los diferentes escenarios en los cuales un enfoque puede ofrecer ventajas por encima de otro, o para explicar los resultados divergentes (Tabla 5), en lugar de insistir en que existe una sola “verdad” o solución. De hecho, aunque existe una queja constante para librar a la nutrición deportiva del “dogma” [4], sería contraproducente si las nuevas ideas fueran tan dogmáticas como las antiguas creencias que intentan reemplazar. Este autor y otros continúan investigando para evolucionar y refinar la comprensión de las condiciones en las que una baja disponibilidad de carbohidratos puede ser tolerada o realmente beneficiosa [58, 59]. Sin embargo, nosotros también reconocemos que los beneficios de los carbohidratos como sustratos en un rango completo de intensidades de ejercicio por medio de sendas separadas [16], la mejor economía de oxidación de carbohidratos contra la oxidación de grasas (ATP producido por L de oxígeno quemado) [60], y el potencial beneficio para el SNC de saborear carbohidratos en boca [61] pueden contribuir con un rendimiento deportivo óptimo y no deben ser simplemente descartados debido al atractivo del tamaño de las reservas corporales de grasa. En otras palabras, no debería existir una elección de un combustible por encima de otro, ni “negro contra blanco”, sino un deseo de integrar e individualizar los diferentes factores dietéticos que pueden producir un rendimiento deportivo óptimo.

Tabla 5. Escenarios o explicaciones para los testimonios/observaciones de mejor rendimiento luego de un cambio hacia una dieta con bajo contenido de carbohidratos y alta en grasas (LCHF).

Escenarios que favorecen la adaptación a la dieta LCHF	Otras explicaciones para los informes anecdóticos sobre los beneficios para el rendimiento de adoptar la dieta LCHF
Individuos o eventos que contemplan esfuerzos submáximo prolongados en los cuales no hay beneficios ni necesidad de períodos de mayor intensidad	El cambio hacia la dieta LCHF se ha asociado con pérdida de grasa corporal y con un aumento la relación potencia/peso
Individuos o eventos en donde es difícil consumir una cantidad adecuada de CHO para cumplir con las metas de disponibilidad óptima de CHO (por ejemplo, afecciones gastrointestinales, dificultades logísticas para acceder a los suministros durante el evento)	La dieta y el entrenamiento previos eran sub-óptimos, y el cambio se asoció con un mayor entrenamiento y mayor disciplina en la dieta
Individuos que tienen sensibilidad a los carbohidratos y probablemente están expuestos a una baja disponibilidad de CHO	Efecto del orden: progreso natural en el entrenamiento y maduración en la edad y experiencia deportiva
	El programa previo no incluyó la medición exacta del rendimiento: el conocimiento sobre la medición del rendimiento recién comienza
	El efecto placebo/la emoción de ser parte de una nueva idea/cultura
	El atleta realmente no está adhiriendo a la dieta LCHF, debido a una mala interpretación de su verdadera composición o actividades propias de “picoteo”, de modo que los patrones de alimentación incluyen suficientes CHO alrededor de las sesiones de entrenamiento y competencias importantes de modo que hay una elevada disponibilidad de CHO.

La ciencia y práctica de estas estrategias todavía están evolucionando, y de hecho, un comentario final de este autor de la literatura actual sobre las dietas LCHF para el rendimiento deportivo es que; otra razón para considerarla incompleta es que la dieta “control” óptima (o la intervención adicional) no ha sido todavía incluida en las comparaciones con las técnicas de adaptación a las grasas. Los estudios futuros deben investigar las diferentes estrategias de LCHF en comparación con el

modelo evolucionado de dieta de entrenamiento “carbohidratos-periodizada”, en lugar de (o también) una dieta crónicamente alta en disponibilidad de carbohidratos, para determinar los mejores enfoques para los diferentes individuos, las diferentes metas y preparaciones para los diferentes eventos deportivos. Considerando que los atletas podrían obtener un mayor beneficio a partir de un rango de opciones alimentarias probablemente tendríamos un mejor modelo para la nutrición deportiva óptima en vez de insistir en una sola solución que se adapte a todos los casos.

Agradecimientos

Este artículo fue publicado en un suplemento apoyado por el Instituto de Ciencias Deportivas de Gatorade (GSSI). El suplemento fue editado por el invitado Lawrence L. Spriet quien asistió a una reunión del panel de expertos de GSSI (XP) en marzo de 2014 y cobró honorarios de GSSI por su participación en la reunión. No recibió ningún honorario por la edición del suplemento. Dr. Spriet seleccionó a los pares que revisarían el manuscrito y manejó el proceso. Louise Burke asistió a una reunión del GSSI XP en febrero de 2014, y su lugar de trabajo (Instituto Australiano de Deporte) recibió un honorario del GSSI, una división de PepsiCo, Inc., por su participación en la reunión y por la escritura de este manuscrito. Las opiniones expresadas en este manuscrito pertenecen al autor y no necesariamente reflejan la posición o política de PepsiCo, Inc. La investigación realizada por este autor sobre las estrategias de adaptación a las grasas fue realizada con financiamiento otorgado por el Instituto Australiano de Deporte, Kelloggs, Australia y Nestle Australia.

REFERENCIAS

1. Havemann L. , West S. , Goedecke J. H. , et al. (2006). Fat adaptation followed by carbohydrate-loading compromises high-intensity sprint performance. *J. Appl. Physiol.* 100:194-202.
2. Burke L. M. , Kiens B. (2006). “Fat adaptation” for athletic performance- the nail in the coffin? *J. Appl. Physiol.* 100:7-8.
3. Noakes T. , Volek J. S. , Phinney S. D. (2014). Low-carbohydrate diets for athletes: what evidence? *Br. J. Sports Med.* 48:1077-8.
4. Brukner P. (2013). Challenging beliefs in sports nutrition: are two ‘core principles’ proving to be myths ripe for busting? *Br. J. Sports Med.* 47:663-4.
5. Volek J. S. , Noakes T. , Phinney S. D. (2014). Rethinking fat as a fuel for endurance exercise. *Eur. J. Sports Sci.* 79:1-8.
6. Phinney S. D. (2004). Ketogenic diets and physical performance. *Nutr. Metab.* 1:2.
7. Volek J. S. , Phinney S. D. (2012). The art and science of low carbohydrate performance. *Beyond Obesity LLC.*
8. Brukner P. Can elite athletes eat LCHF and win? (2013). Available from: www.youtube.com/watch?v=JMud4Z-Oxys. Accessed 30 June 2015.
9. Olsen A. , Tim Noakes: (2014). Low carbohydrate diet for endurance sports. 2014. Available from: www.youtube.com/watch?v=iFxz7YFjycg. Accessed 30 June 2015.
10. Hall N. (2014). The Kardashian index: a measure of discrepant social media profile for scientists. *Genome Biol.* 15:424.
11. Noakes TD. (2013). Low-carbohydrate and high-fat intake can manage obesity and associated conditions: Occasional survey. *S. Afr. Med. J.* 103:824-5.
12. Hopkins W. G. , Hawley J. A. , Burke L. M. (1999). Design and analysis of research on sport performance enhancement. *Med. Sci. Sports Exerc.* 31:472-85.
13. Hawley J. A. , Burke L. M. , Phillips S. M. , et al. (2011). Nutritional modulation of training-induced skeletal muscle adaptations. *J. Appl. Physiol.* 110:834-45.
14. Stellingwerff T. (2013). Contemporary nutrition approaches to optimize elite marathon performance. *Int J Sports Physiol. Perform.* 8:573-8.
15. Burke L. (2007). Training and competition nutrition. In: *Burke L, editor. Practical sports nutrition. Champaign: Human Kinetics. p. 1-26.*
16. Spriet L. L. (2014). New insights into the interaction of carbohydrate and fat metabolism during exercise. *Sports Med.* 44:S87-96.
17. Fernandez-Garcia B. , Perez-Landaluce J. , Rodriguez-Alonso M. , et al. (2000). Intensity of exercise during road race pro-cycling competition. *Med. Sci. Sports Exerc.* 32:1002-6.
18. Bentley D. J. , Millet G. P. , Vleck V. E. , et al. (2002). Specific aspects of contemporary triathlon: implications for physiological analysis and performance. *Sports Med.* 32:345-59.
19. Tucker R. Science of sport: marathon analysis. (2014). In: *Marathon analysis. http://sportsscientists.com/thread/marathon-analysis-2/*. Accessed 20 Oct.
20. Joyner M. J. , Ruiz J. R. , Lucia A. (2011). The two-hour marathon: who and when? *J. Appl. Physiol.* 110:275-7.
21. Peters A. , Schweiger U. , Pellerin L, et al. (2004). The selfish brain: competition for energy resources. *Neurosci. Biobehav. Rev.* 28:143-80.
22. Matsui T. , Soya S. , Okamoto M. , et al. (2011). Brain glycogen decreases during prolonged exercise. *J. Physiol.* 589:3383-93.
23. Zhang Y. , Kuang Y. , LaManna J. C. , et al. (2013). Contribution of brain glucose and ketone bodies to oxidative metabolism. *Adv. Exp. Med. Biol.* ;765:365-70.
24. Karelis A. D. , Smith J. W. , Pässe D. H. , et al. (2010). Carbohydrate administration and exercise performance: what are the potential mechanisms involved? *Sports Med.* 40:747-63.
25. Jeukendrup A. E. , Saris W. H. M. , Wagenmakers A. J. M. (1998). Fat metabolism during exercise: a review. *Part III: effects of*

- nutritional interventions. *Int. J. Sports Med.* 19:371-9.
26. Hawley J. A. (2002). Effect of increased fat availability on metabolism and exercise capacity. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34:1485-91.
 27. Starling R. D. , Trappe T. A, Parcell A. C, et al. (1997). Effects of diet on muscle triglyceride and endurance performance. *J. Appl. Physiol.* 82:1185-9.
 28. Pitsiladis Y. P. , Maughan R. J. (1999). The effects of exercise and diet manipulation on the capacity to perform prolonged exercise in the heat and in the cold in trained humans. *J. Physiol.* 517: 919-30.
 29. Yeo W. K. , Carey A. L. , Burke L. , et al. (2011). Fat adaptation in well-trained athletes: effects on cell metabolism. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 36:12-22.
 30. Phinney S. D. , Bistrian B. R. , Evans W. J. , et al. (1983). The human metabolic response to chronic ketosis without caloric restriction: preservation of submaximal exercise capability with reduced carbohydrate oxidation. *Metabolism.* 32:769-76.
 31. Phinney S. D. , Bistrian B. R. , Wolfe R. R. , et al. (1983). The human metabolic response to chronic ketosis without caloric restriction: physical and biochemical adaptation. *Metabolism.* 32:757-68.
 32. Batterham A. M. , Hopkins W. G. (2006). Making meaningful inferences about magnitudes. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 1:50-7.
 33. O'Keeffe K. A. , Keith R. E. , Wilson G. D. , et al. (1989). Dietary carbohydrate intake and endurance exercise performance of trained female cyclists. *Nutr. Res.* 9:819-30.
 34. Lambert E. V. , Speechly D. P. , Dennis S. C. , et al. (1994). Enhanced endurance in trained cyclists during moderate intensity exercise following 2 weeks adaptation to a high fat diet. *Eur. J. Appl. Physiol.* 69:287-93.
 35. Goedecke J. H. , Christie C. , Wilson G. , et al. (1999). Metabolic adaptations to a high-fat diet in endurance cyclists. *Metabolism.* 48:1509-17.
 36. Rowlands D. S. , Hopkins W. G. (2002). Effects of high-fat and high-carbohydrate diets on metabolism and performance in cycling. *Metabolism.* 51:678-90.
 37. Vogt M. , Puntchart A. , Howald H. , et al. (2003). Effects of dietary fat on muscle substrates, metabolism, and performance in athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 35:952-60.
 38. Hoppeler H. , Billeter R. , Horvath P. J. , et al. (1999). Muscle structure with low- and high-fat diets in well-trained male runners. *Int. J. Sports Med.* 20:522-6.
 39. Muoio D. M. , Leddy J. J. , Horvath P. J. , et al. (1994). Effect of dietary fat on metabolic adjustments to maximal VO₂ and endurance in runners. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26:81-8.
 40. Burke L. M. , Hawley J. A. (2002). Effects of short-term fat adaptation on metabolism and performance of prolonged exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34:1492-8.
 41. Burke L. M. , Hawley J. A. , Angus D. J. , et al. (2002). Adaptations to short-term high-fat diet persist during exercise despite high carbohydrate availability. *Med. Sci. Sports Exerc.* 34:83-91.
 42. Carey A. L. , Staudacher H. M. , Cummings N. K, et al. (2001). Effects of fat adaptation and carbohydrate restoration on prolonged endurance exercise. *J. Appl. Physiol.* 91:115-22.
 43. Noakes T. (2004). Fat adaptation and prolonged exercise performance. *J. Appl. Physiol.* ;96:1243 (Author reply).
 44. Lambert E. V. , Goedecke J. H. , Van Zyl C. G. , et al. (2001). High-fat versus habitual diet prior to carbohydrate loading: effects on exercise metabolism and cycling performance. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 11:209-25.
 45. Burke L. M. , Angus D. J. , Cox G. R. , et al. (2000). Effect of fat adaptation and carbohydrate restoration on metabolism and performance during prolonged cycling. *J. Appl. Physiol.* 89:2413-21.
 46. Stellingwerff T. , Spriet L. L. , Watt M. J. , et al. (2006). Decreased PDH activation and glycogenolysis during exercise following fat adaptation with carbohydrate restoration. *Am. J. Physiol.* 290:E380-8.
 47. Peters S. J. , Harris R. A. , Wu P. , et al. (2001). Human skeletal muscle PDH kinase activity and isoform expression during a 3-day high-fat/ low-carbohydrate diet. *Am. J. Physiol.* 281:E1151-68.
 48. Erlenbusch M. , Haub M. , Munoz K. , et al. (2005). Effect of high-fat or high-carbohydrate diets on endurance exercise: a meta-analysis. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 15:1-14.
 49. Zajac A. , Poprzecki S. , Maszczyk A. , et al. (2014). The effects of a ketogenic diet on exercise metabolism and physical performance in off-road cyclists. *Nutrients.* 6:2493-508.
 50. Paoli A. , Grimaldi K. , D'Agostino D. , et al. (2012). Ketogenic diet does not affect strength performance in elite artistic gymnasts. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 9:34.
 51. Nordmann A. J. , Nordmann A. , Briel M. , et al. (2006). Effects of low-carbohydrate vs low-fat diets on weight loss and cardiovascular risk factors: a meta-analysis of randomized controlled trials. *Arch. Intern. Med.* 166:285-93.
 52. Feinman R. D. , Pogozelski W. K. , Astrup A. , et al. (2015). Dietary carbohydrate restriction as the first approach in diabetes management: Critical review and evidence base. *Nutrition.* 31:1-13.
 53. Burke L. M. , Hawley J. A. , Wong S. H. , et al. (2011). Carbohydrates for training and competition. *J. Sports Sci.* 29:S17-27.
 54. Stellingwerf T. (2012). Case study: nutrition and training periodization in three elite marathon runners. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* ;22:392-400.
 55. Shaw G. , Boyd K. T. , Burke L. M. , et al. (2014). Nutrition for swimming. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 24:360-72.
 56. Shaw G. , Koivisto A. , Gerrard D. , Burke L. M. (2014). Nutrition considerations for open-water swimming. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 24:373-81.
 57. Burke L. M. , Mujika I. (2014). Nutrition for recovery in aquatic sports. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 24:425-36.
 58. Philp A. , Burke L. M. , Baar K. (2011). Altering endogenous carbohydrate availability to support training adaptations. *Nestle Nutr. Inst. Workshop Ser.* 69:19-31 (discussion 31-7).
 59. Bartlett J. D. , Hawley J. A. , Morton J. P. (2015). Carbohydrate availability and exercise training adaptation: too much of a good thing? *Eur. J. Sports Sci.* 15:3-12.
 60. Cole M. , Coleman D. , Hopker J. , et al. (2014). Improved gross efficiency during long duration submaximal cycling following a short-term high carbohydrate diet. *Int. J. Sports Med.* 35:265-9.
 61. Burke L. M. , Maughan R. J. (2015). The Governor has a sweet tooth- mouth sensing of nutrients to enhance sports performance.

Eur. J. Sports Sci. 15:29-40.

62. Mujika I. , Padilla S. (1997). Creatine supplementation as an ergogenic aid for sports performance in highly trained athletes: a critical review. *Int. J. Sports Med.* 18:491-6.
63. Casey A. , Greenhaff P. L. (2000). Does dietary creatine supplementation play a role in skeletal muscle metabolism and performance? *Am. J. Clin. Nutr.* 72:607S-17S.
64. Hawley J. A. , Schabert E. J. , Noakes T. D. , et al. (1997). Carbohydrate-loading and exercise performance: an update. *Sports Med.* 24:73-81.
65. Coyle E. F. (1991). Timing and method of increased carbohydrate intake to cope with heavy training, competition and recovery. *J. Sports Sci.* 9:S29-52.
66. Stellingwerff T. , Cox G. R. (2014). Systematic review: carbohydrate supplementation on exercise performance or capacity of varying durations. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 39:1-14.
67. Jeukendrup A. E. (2013). Oral carbohydrate rinse: placebo or beneficial? *Curr. Sports Med. Rep.* 12:222-7.
68. Jeukendrup A. E. , Thielen J. J. H. C. , Wagenmakers A. J. M. , et al. (1998). Effect of medium-chain triacylglycerol and carbohydrate ingestion during exercise on substrate utilization and subsequent cycling performance. *Am. J. Clin. Nutr.* 67:397-404.

Cita Original

Burke Louise M.(2015). Re-Examining High-Fat Diets for Sports Performance: Did We Call the 'Nail in the Coffin' Too Soon? *Sports Med.* DOI 10.1007/s40279-015-0393-9