

Artículo de revisión / Review Article

Carbohydrate during exercise: research of last 10 years turned into new recommendations

ASKER JEUKENDRUP

Gatorade Sports Science Institute (Barrington, IL - USA)
School of Sport and Exercise Sciences
University of Birmingham (Edgbaston, Birmingham - UK)

Abstract

There have been significant changes in the understanding of the role of carbohydrate during exercise in recent years and this allows for more specific and more individualised advice with regards to carbohydrate ingestion during exercise. The new guidelines proposed take into account the duration (and intensity) of exercise and advice is not restricted to the amount of carbohydrate, it also gives direction with respect to the type of carbohydrate. The recommended carbohydrate intake can be achieved by consuming drinks, gels of low fat, low protein and low fibre solid foods (bars) and selection should be determined by personal preference. It must be noted that most studies are based on findings in runners and cyclist and more work is needed to establish the effects and underlying mechanisms of carbohydrate ingestion on skill components in intermittent team sports.

Keywords: *carbohydrates ingestion, exercise, performance, glucose, fructose*

Introduction

We are all aware that carbohydrates and fats are the most important fuels during exercise. This has not always been the case. Till the late 1800s it was believed that protein was the most important source

Los carbohidratos durante el ejercicio: la investigación de los últimos 10 años. Nuevas recomendaciones

ASKER JEUKENDRUP

Instituto Gatorade de Ciencias del Deporte (Barrington, IL - USA)
Facultad de Ciencias del Deporte y el Ejercicio
University of Birmingham (Edgbaston, Birmingham - UK)

Resumen

Durante los últimos años se han producido cambios significativos en la comprensión del papel que juegan los carbohidratos durante el ejercicio, y esto permite realizar un asesoramiento más específico y más individualizado en cuanto a la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio. Las nuevas directrices propuestas tienen en cuenta la duración (y la intensidad) del ejercicio y el asesoramiento no se limita a la cantidad de carbohidratos, sino que también propone el tipo de estos. La ingesta recomendada de carbohidratos se puede lograr consumiendo bebidas, geles con pocas grasas o alimentos sólidos bajos en proteínas y en fibra (barritas) y la elección debe basarse en las preferencias personales. Debe tenerse en cuenta que la mayoría de estudios se basan en descubrimientos realizados con corredores y ciclistas, por lo que es necesario investigar más para establecer los efectos y los mecanismos subyacentes de la ingestión de carbohidratos en los componentes de habilidad de deportes intermitentes de equipo.

Palabras clave: ingesta de carbohidratos, ejercicio, rendimiento, glucosa, fructosa

Introducción

Todos sabemos que los carbohidratos y las grasas son los combustibles más importantes durante el ejercicio. Pero no siempre ha sido así. Hasta finales del siglo XIX se creía que las proteínas eran la fuente más importante de energía

of energy for muscle. In the early 1900s it was discovered that not protein but carbohydrate was an important fuel for exercise (Krogh & Lindhard, 1920). In 1939 a paper was published that showed that carbohydrate use during exercise could be influenced by diet and that this could improve exercise tolerance (Christensen & Hansen, 1939). In the 1960s it became clear that muscle glycogen played a significant role (Bergstrom & Hultman, 1966) and in the 1980s the first studies showed that carbohydrate ingestion during exercise improved exercise capacity (Coggan & Coyle, 1987; Coyle et al., 1983). In the years that followed the field did not advance much until 2004, which marked the beginning of a series of major breakthroughs with respect to carbohydrate feeding during exercise. These breakthroughs and their effects on sports nutrition guidelines will be discussed in this review article.

As new information became available over time, recommendation for athletes evolved as well. Although on most recent guidelines, it is generally accepted that carbohydrate intake is important to optimise endurance performance, recommendations are not very specific (Rodríguez, Di Marco, & Langley, 2009). For example, the most recent guidelines by the American College of Sports Medicine state that a carbohydrate intake of 30-60 grams per hour is recommended during exercise (Rodríguez et al.), but does not specify the type of activity, the level of athlete etc. Does this mean that these general recommendations are appropriate for everyone from recreational football player to professional cyclist?

With the evidence from studies and new insights obtained in the last 5-10 years it is possible to provide much more prescriptive and precise advice to athletes. It is beyond the scope of this review to discuss all the underlying evidence in great detail, as this has been done in several other recent reviews (Jeukendrup, 2004, 2010, 2011; Jeukendrup & Chambers, 2010; Jeukendrup & McLaughlin, 2011), but the purpose of this review is to bring all the different pieces of information together and translate our current understanding into practical guidelines for athletes competing in different events.

para el músculo. A principios del siglo xx se descubrió que el combustible más importante para el ejercicio no eran las proteínas, sino los carbohidratos (Krogh & Lindhard, 1920). En 1939 se publicó un artículo que demostraba que el uso de carbohidratos durante el ejercicio podía ser influido por la dieta y que este hecho podría mejorar la tolerancia al ejercicio (Christensen & Hansen, 1939). En la década de los 60 quedó claro que el glucógeno del músculo tenía un papel importante (Bergstrom & Hultman, 1966) y, en la década de los 80, unos primeros estudios demostraron que la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio mejoraba la capacidad (Coggan & Coyle, 1987; Coyle et al., 1983). Durante los años siguientes no hubo muchos avances en este campo, hasta el 2004, que marcó el inicio de una serie de descubrimientos importantes respecto a la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio. Estos descubrimientos y sus efectos sobre las directrices de la nutrición en el deporte son los que se tratarán en este artículo de revisión.

A medida que fue apareciendo nueva información, las recomendaciones para los atletas también evolucionaron. Aunque en las directrices más recientes se acepta, generalmente, que la ingestión de carbohidratos es importante para optimizar la resistencia, las recomendaciones no son muy específicas (Rodríguez, Di Marco, & Langley, 2009). Por ejemplo, las directrices más recientes del American College of Sports Medicine recomiendan una ingesta de carbohidratos de 30-60 gramos por hora durante el ejercicio (Rodríguez et al.), pero no especifican el tipo de actividad, el nivel del atleta, etc. ¿Significa esto que estas recomendaciones generales son adecuadas para todos, tanto si se trata de un jugador de fútbol aficionado o de un ciclista profesional?

Con las pruebas obtenidas de estudios y los nuevos descubrimientos realizados en los últimos 5-10 años, es posible ofrecer un asesoramiento mucho más prescriptivo y preciso a los atletas. La discusión en detalle de todas las pruebas permanece fuera del alcance de este artículo, puesto que ya se ha hecho en otros artículos recientes (Jeukendrup, 2004, 2010, 2011; Jeukendrup & Chambers, 2010; Jeukendrup & McLaughlin, 2011). El objetivo de este artículo es reunir toda la información y transformar nuestra comprensión actual en directrices prácticas para los atletas que compiten en diferentes pruebas.

Carbohydrate ingestion during exercise and performance

Although the exact mechanisms are still not completely understood, it has been known for some time that carbohydrate ingestion during exercise can increase exercise capacity and improve exercise performance (for reviews see Jeukendrup, 2008, 2010). In general during exercise longer than 2 hours, carbohydrate feeding will prevent hypoglycaemia, will maintain high rates of carbohydrate oxidation and increase endurance capacity compared with placebo ingestion. As little as 20 g/h carbohydrate is already sufficient to observe a performance benefit during prolonged exercise (Fielding et al., 1985; Maughan, Bethell, & Leiper, 1996). It was believed that the exercise duration had to be around 2h or longer for the carbohydrate feeding to be effective.

However, more recently, it has become clear that also during shorter duration exercise of higher intensity (for example 1h around 75%VO₂max), carbohydrate ingestion during exercise can improve performance. The mechanism behind these performance improvements is completely different. In fact it was demonstrated that when glucose was infused into the systemic circulation, this glucose was taken up at high rates but no performance effect was found. This provides evidence that increasing glucose availability, as a substrate to the working muscle, has no effect during this type of activity. Interestingly, however, when subjects rinsed their mouth with a carbohydrate solution this resulted in performance improvements (Jeukendrup & Chambers, 2010) and these were similar to the improvements seen with carbohydrate ingestion. There are numerous studies now that confirm these initial findings. These studies are reviewed in several recent papers reviews (Jeukendrup, 2004, 2010, 2011; Jeukendrup & Chambers, 2010; Jeukendrup & McLaughlin, 2011). This would suggest that the beneficial effects of carbohydrate feeding during exercise are not confined to its conventional metabolic advantage but may also contribute to a more positive afferent signal capable of modifying motor output (Gant, Stinear, & Byblow, 2010). These effects are specific to carbohydrate

Ingestión de carbohidratos durante el ejercicio y el rendimiento

Aunque todavía no se entienden totalmente los mecanismos exactos, hace ya un cierto tiempo que se sabe que la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio puede aumentar su capacidad y mejorar su rendimiento (para consultar estudios, véase Jeukendrup, 2008, 2010). En general, durante un ejercicio de más de 2 horas de duración, la ingestión de carbohidratos evita la hipoglucemia, mantiene unos niveles elevados de oxidación de los carbohidratos y aumenta la capacidad de resistencia en comparación con la ingestión de placebos. Una cantidad de 20 g/h de carbohidratos es suficiente para observar beneficios en el rendimiento durante un ejercicio prolongado (Fielding et al., 1985; Maughan, Bethell, & Leiper, 1996). Se creía que la duración del ejercicio debía ser de al menos 2 horas o más para que la ingestión de carbohidratos fuera efectiva.

Sin embargo, recientemente ha quedado claro que, también durante el ejercicio de alta intensidad y duración más corta (por ejemplo, 1 h alrededor del 75 % VO₂ máx), la ingestión de carbohidratos puede mejorar el rendimiento. El mecanismo causante de estas mejoras de rendimiento es totalmente diferente. De hecho, se demostró que cuando se introduce glucosa en la circulación sistémica, esta glucosa se absorbe en niveles elevados, pero no se detecta ningún efecto sobre el rendimiento, lo que prueba que aumentar la disponibilidad de glucosa, como sustrato para el músculo, no tiene ningún efecto durante este tipo de actividad. Sin embargo, resulta interesante que cuando los sujetos se enjuagan con una solución de carbohidratos, su rendimiento mejoró (Jeukendrup & Chambers, 2010), y estas mejoras fueron similares a las observadas con la ingestión de carbohidratos. Actualmente, hay diferentes estudios que confirman estos descubrimientos iniciales. Dichos trabajos se revisan en diferentes artículos recientes (Jeukendrup, 2004, 2010, 2011; Jeukendrup & Chambers, 2010; Jeukendrup & McLaughlin, 2011). Esto sugiere que los efectos beneficiosos de la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio no se limitan a sus ventajas metabólicas convencionales, sino que también pueden contribuir a una señal aferente más positiva, capaz de modificar la respuesta motora (Gant, Stinear, & Byblow, 2010). Estos efectos son específicos de los carbohidratos

and are independent of taste (Chambers, Bridge, & Jones, 2009).

It is likely that receptors in the oral cavity mediate these effects but such receptors have not yet been identified in humans and the exact role of various brain areas is not clearly understood. However, it has been convincingly demonstrated that carbohydrate is detected in oral cavity by unidentified receptors and this can be linked to improvements in exercise performance (for review see Jeukendrup & Chambers, 2010). New guidelines suggested here take these findings into account (Figure 1).

Practical implications of the mouth rinse studies

These results suggest that it is not necessary to ingest large amounts of carbohydrate during exercise lasting approximately 30 min to 1 hour and a mouth rinse with carbohydrate may be sufficient to get a performance benefit (Figure 1). In most conditions the performance effects with the mouth rinse were similar to ingesting the carbohydrate drink, so there does not seem to be a disadvantage of consuming the drink, although occasionally athletes may complain of gastro-intestinal distress when consuming larger amounts. When the exercise is more prolonged (2h or more), carbohydrate becomes a very important fuel and to prevent a decrease in performance it is essential to ingest carbohydrate. As will be discussed below, larger amounts of carbohydrate may be required for more prolonged exercise.

Prolonged exercise and multiple transportable carbohydrates

Different carbohydrates ingested during exercise may be utilised at different rates (Jeukendrup, 2010) but until a landmark publication in 2004 (Jentjens, Moseley, Waring, Harding, & Jeukendrup, 2004) it was believed that carbohydrate ingested during exercise could only be oxidised at a rate no higher than 1 g/min (60 g/h)

y son independientes del gusto (Chambers, Bridge, & Jones, 2009).

Es probable que los receptores de la cavidad oral influyan en estos efectos, pero estos receptores todavía no han sido identificados en humanos y el papel exacto de diferentes zonas del cerebro todavía no se entiende claramente. Sin embargo, se ha demostrado de manera convincente que los carbohidratos se detectan en la cavidad oral mediante receptores no identificados y este hecho se puede relacionar con las mejoras en el rendimiento durante el ejercicio (para consultar estudios, véase Jeukendrup & Chambers, 2010). Las nuevas directrices que se proponen en este artículo tienen en cuenta estos descubrimientos (*figura 1*).

Implicaciones prácticas de los estudios de enjuague bucal

Estos resultados sugieren que no hay que ingerir grandes cantidades de carbohidratos durante un ejercicio de aproximadamente 30 minutos a 1 hora de duración, sino que enjuagarse la boca con carbohidratos puede ser suficiente para mejorar el rendimiento (*figura 1*). En la mayoría de situaciones, los efectos sobre el rendimiento con el enjuague bucal fueron similares a los de la ingestión de una bebida con carbohidratos, por lo que no parece que haya ninguna desventaja al consumir la bebida, aunque a veces los atletas pueden quejarse de problemas gastrointestinales cuando consumen grandes cantidades. Cuando el ejercicio es más prolongado (2 horas o más), los carbohidratos se convierten en un combustible muy importante y, para evitar una disminución en el rendimiento, es esencial ingerirlos. Tal como trataremos más adelante, es posible que sean necesarios grandes cantidades de carbohidratos a la hora de realizar un ejercicio más prolongado.

Ejercicio prolongado y transporte múltiple de carbohidratos

Diferentes tipos de carbohidratos ingeridos durante el ejercicio pueden ser utilizados en diferentes niveles (Jeukendrup, 2010), pero hasta que no se publicó un artículo de referencia en 2004 (Jentjens, Moseley, Waring, Harding, & Jeukendrup, 2004), se creía que los carbohidratos ingeridos durante el ejercicio sólo se podían oxidar a una tasa no superior a 1 g/min (60 g/h),

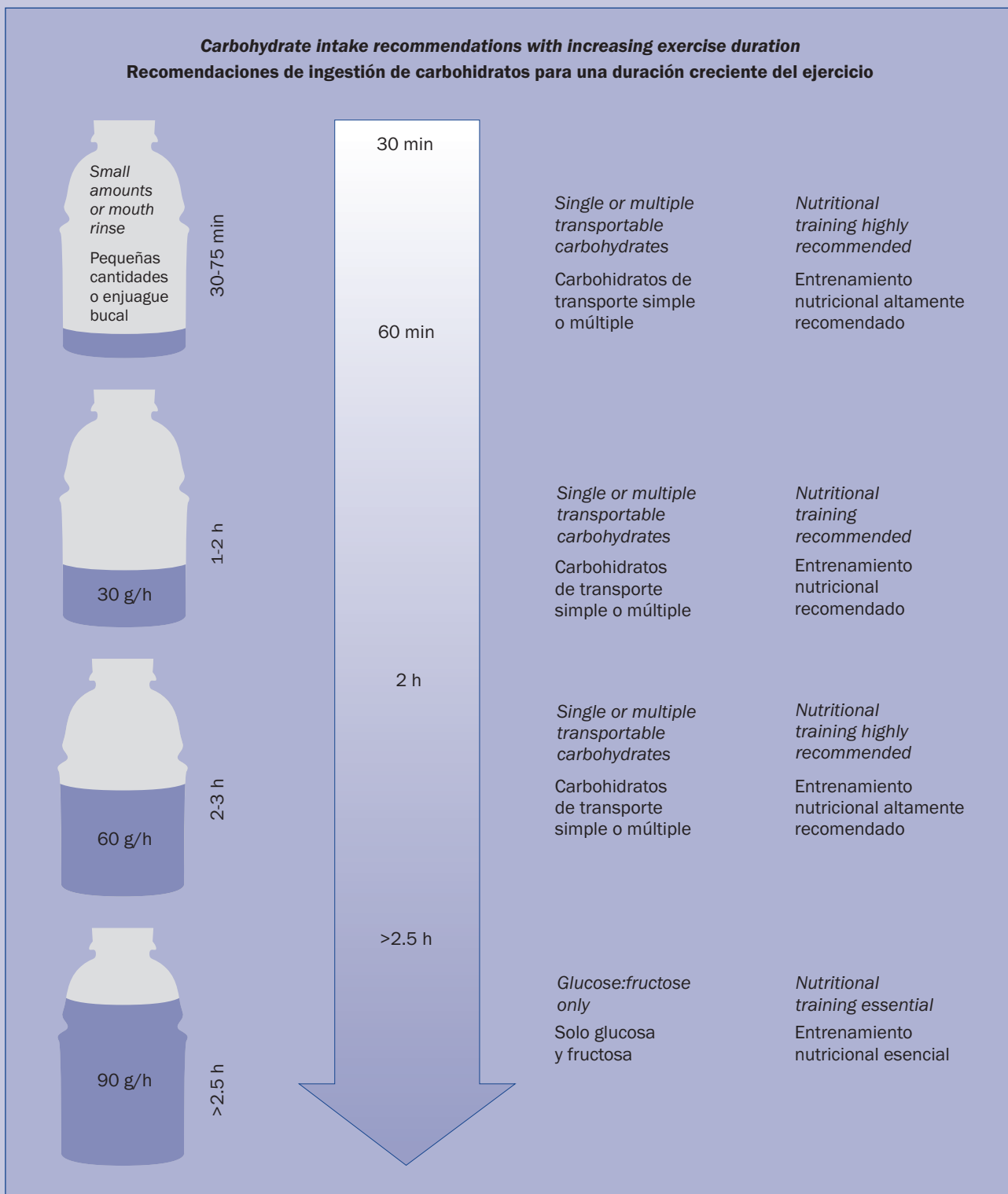


Figure 1. Carbohydrate intake recommendations during exercise for exercise of different durations. These values are for high level athletes and should adjusted downwards for aspiring athletes

Figura 1. Recomendaciones de ingestión de carbohidratos durante el ejercicio para ejercicios de diferentes duraciones. Estos valores están pensados para atletas de alto nivel y se ajustarán a la baja para atletas aficionados

independent of the type of carbohydrate (Jeukendrup & Jentjens, 2000). This is reflected in guidelines which typically recommend an upper limit of intake around 60 grams of carbohydrate per hour during endurance exercise (>1h) (Sawka et al., 2007).

It appears that exogenous carbohydrate oxidation is limited by the intestinal absorption of carbohydrates. It is believed that glucose uses a sodium dependent transporter SGLT1 for absorption, which becomes saturated at a carbohydrate intake around 60 grams per hour. When glucose is ingested at this rate and another carbohydrate (fructose) that uses a different transporter is ingested simultaneously, oxidation rates that were well above 1 g/min (1.26 g/min) (Jentjens et al., 2004) can be observed. A series of studies followed in an attempt to work out the maximal rate of exogenous carbohydrate oxidation. In these studies the rate of carbohydrate ingestion was varied and the types and combinations of carbohydrates varied. All studies confirmed that multiple transportable carbohydrates resulted in (up to 75%) higher oxidation rates than carbohydrates that use the SGLT1 transporter only (for reviews see Jeukendrup, 2008, 2010). Interestingly such high oxidation rates could not only be achieved with carbohydrate ingested in a beverage but also as a gel (Pfeiffer, Stellingwerff, Zaltas, & Jeukendrup, 2010a) or a low fat, low protein, low fibre energy bar (Pfeiffer, Stellingwerff, Zaltas, & Jeukendrup, 2010b).

There are several studies that link the increased exogenous carbohydrate oxidation rates observed with multiple transportable carbohydrates to delayed fatigue and improved exercise performance. Ratings of perceived exertion (RPE) during prolonged exercise may be lower with a mixture of glucose and fructose than with glucose alone and cadence might be better maintained in cyclists (Jeukendrup et al., 2006; Rowlands, Thorburn, Thorp, Broadbent, & Shi, 2008). It was also demonstrated that a glucose:fructose drink could improve exercise performance (Currell & Jeukendrup, 2008). Cyclists exercised for 2 hours on a cycle ergometer at 54%VO₂max during which they ingested either a carbohydrate drink or placebo and were then asked to perform a time trial that lasted

independientemente del tipo de carbohidrato (Jeukendrup & Jentjens, 2000). Este hecho se refleja en directrices que normalmente recomiendan un límite máximo de ingestión de unos 60 gramos de carbohidratos por hora durante un ejercicio de resistencia (> 1 h) (Sawka et al., 2007).

Parece que la oxidación exógena de carbohidratos se ve limitada por la absorción intestinal de estos. Se cree que la glucosa utiliza un transportador SGLT1 dependiente del sodio para la absorción, que se satura con una ingestión de carbohidratos de unos 60 gramos por hora. Cuando se ingiere este nivel de glucosa y otro carbohidrato (fructosa) que utilice un transportador diferente de manera simultánea, se pueden observar tasas de oxidación bastante superiores a 1 g / min (1,26 g/min) (Jentjens et al., 2004). Se publicó una serie de estudios con el objetivo de descubrir la tasa máxima de oxidación exógena de carbohidratos. En estos estudios, la tasa de ingestión de carbohidratos era variada y los tipos y sus combinaciones también lo eran. Todos los estudios confirmaron que el transporte múltiple de carbohidratos tenía como resultado unas tasas de oxidación superiores (hasta un 75 %) a las de los carbohidratos que utilizan sólo el transportador SGLT1 (para consultar estudios, véase Jeukendrup, 2008, 2010). Resulta interesante que estas tasas de oxidación tan elevadas no sólo se podían conseguir mediante carbohidratos ingeridos en una bebida, sino también en forma de gel (Pfeiffer, Stellingwerff, Zaltas, & Jeukendrup, 2010a) o de barrita energética baja en grasa, en proteínas y en fibra (Pfeiffer, Stellingwerff, Zaltas, & Jeukendrup, 2010b).

Hay varios estudios que vinculan el aumento de las tasas de oxidación exógena de los carbohidratos observadas en el transporte múltiple de carbohidratos con el retraso de la fatiga y el aumento del rendimiento durante el ejercicio. Las tasas de esfuerzo percibido (RPE) durante un ejercicio prolongado pueden ser inferiores con una mezcla de glucosa y fructosa que sólo con glucosa, y los ciclistas pueden mantener mejor el ritmo (Jeukendrup et al., 2006; Rowlands, Thorburn, Thorp, Broadbent, & Shi, 2008). También se demostró que una bebida de glucosa:fructosa puede mejorar el rendimiento durante el ejercicio (Currell & Jeukendrup, 2008). Los ciclistas hicieron ejercicio durante 2 horas en una bicicleta ergométrica al 54 % VO₂ máx, tiempo durante el cual ingirieron una bebida de carbohidratos o un placebo. Se les pidió

Recommendations for carbohydrate intake during exercise are dependent on exercise duration, the absolute exercise intensity as well as the sport and its rules and regulations (see figure 1).

Athletes who perform at absolute intensities that are lower will have lower carbohydrate oxidation rates and the amounts presented in figure 1 should be adjusted (downwards) accordingly.

The recommended carbohydrate intake can be achieved by consuming drinks, gels of low fat, low protein and low fibre solid foods (bars) and selection should be based on personal preference.

Athletes can adopt a mix and match strategy to achieve their carbohydrate intake goals.

Carbohydrate intake should be balanced with a fluid intake plan based on fluid needs and it must be noted that solid foods and highly concentrated carbohydrate solutions have been shown to reduce fluid absorption.

It is highly recommended to train/practice the nutrition strategy for competition to reduce the chances of gastrointestinal discomfort and to increase the absorptive capacity of the intestine.

▲
Figure 2. Recommendations for carbohydrate intake during different endurance events

approximately 60 min. When the subjects ingested a glucose drink (at 1.8 g/min), they improved their power output by 9% (254W versus 231W). However, when they ingested glucose:fructose there was another 8% improvement of the power output over and above the improvement by glucose ingestion (275W versus 254W). Other studies confirmed the benefits of glucose:fructose compared with glucose only (Rowlands, Swift, Ros, & Green, 2012; Triplett, Doyle, Rupp, & Benardot, 2010).

Performance benefits have generally be observed in studies that are 2.5h or longer and effects start to become visible in the third hour of exercise (Jeukendrup et al., 2006). When exercise duration is shorter, or intakes are below 70 g/h multiple transportable carbohydrates may not have the same performance benefits (Hulston, Wallis, & Jeukendrup, 2009), but it must be noted that in these situations the effects are at least similar to other carbohydrate sources.

Las recomendaciones sobre la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio dependen de la duración del ejercicio, de la intensidad absoluta del ejercicio, y del deporte y sus normas y reglas (véase la figura 1).

Los atletas que trabajan a intensidades absolutas inferiores obtendrán tasas de oxidación de carbohidratos inferiores y, por tanto, deben ajustarse a la baja las cantidades que aparecen en la figura 1.

La ingesta recomendada de carbohidratos se puede conseguir consumiendo bebidas, geles con pocas grasas o alimentos sólidos bajos en proteínas y en fibra (barritas) y la elección debe basarse en las preferencias personales.

Los atletas pueden utilizar una mezcla de estrategias para lograr sus objetivos en cuanto a la ingestión de carbohidratos.

La ingestión de carbohidratos debe equilibrarse con un plan de ingestión de líquidos basado en las necesidades de líquido. Hay que tener en cuenta que se ha demostrado que los alimentos sólidos y las soluciones de carbohidratos altamente concentradas reducen la absorción de líquidos.

Se recomienda poner en práctica la estrategia de nutrición con tiempo, antes de la competición, para reducir las probabilidades de molestias gastrointestinales y aumentar la capacidad de absorción del intestino.

▲
Figura 2. Recomendaciones de ingestión de carbohidratos durante diferentes pruebas de resistencia

que hicieran una prueba cronometrada que duró aproximadamente 60 minutos. Cuando los sujetos ingerían una bebida de glucosa (a 1,8 g/min), mejoraba su potencia un 9% (254 W vs. 231 W). Sin embargo, cuando ingerían glucosa:fructosa, se producía otra mejora del 8% de la potencia, superior a la producida por la ingestión de glucosa (275 W vs. 254 W). Otros estudios confirmaron los beneficios de la glucosa:fructosa en comparación con la glucosa sola (Rowlands, Swift, Ros, & Green, 2012; Triplett, Doyle, Rupp, & Benardot, 2010).

Los beneficios sobre el rendimiento se han observado generalmente en estudios de 2,5 horas o más y los efectos comienzan a ser visibles durante la tercera hora de ejercicio (Jeukendrup et al., 2006). Cuando la duración del ejercicio es más corta o las ingestiones son inferiores a 70 g/h, es posible que el transporte múltiple de carbohidratos no tenga los mismos beneficios sobre el rendimiento (Hulston, Wallis, & Jeukendrup, 2009), pero hay que tener en cuenta que, en estas situaciones, los efectos son, como mínimo, similares a los de otras fuentes de carbohidratos.

Carbohydrate during exercise and performance: dose response

Very few well controlled dose-response studies on carbohydrate ingestion during exercise and exercise performance have been published. Most of the older studies had serious methodological issues that made it difficult to establish a true dose response relationship between the amount of carbohydrate ingested and performance. Until a few years ago the conclusion seemed to be that you needed a minimum amount of carbohydrate (probably about 20 grams per hour based on one study) but it was generally assumed that there was no dose response relationship (Rodríguez et al., 2009). Good dose-response studies, however, were noticeably absent at that time.

More recently, however, evidence has been accumulating for a dose response relationship between carbohydrate ingestion rates, exogenous carbohydrate oxidation rates and performance. In one recent carefully conducted study, endurance performance and fuel selection was measured during prolonged exercise while ingesting glucose (15, 30, and 60 g/h) (Smith, Zachwieja, Peronnet et al., 2010). Twelve subjects cycled for 2-h at 77%VO_{2peak} followed by a 20-km time trial. The results suggest a relationship between the dose of glucose ingested and improvements in endurance performance. The exogenous glucose oxidation increased with ingestion rate and it is possible that an increase in exogenous carbohydrate oxidation is directly linked with, or responsible for, exercise performance.

A large scale multicentre study by Smith, Zachwieja, Horswill et al. (2010) also investigated the relationship between carbohydrate ingestion rate and cycling time trial performance to identify a range of carbohydrate ingestion rates that would enhance performance. In their study, across 4 research sites, 51 cyclists and triathletes completed four exercise sessions consisting of a 2-hour constant load ride at a moderate to high intensity. Twelve different beverages (consisting of glucose:fructose in a 2:1 ratio) were compared, providing participants with 12 different carbohydrate doses ranging from

Los carbohidratos durante el ejercicio y el rendimiento: respuesta a la dosis

Se han publicado escasos estudios bien controlados sobre la respuesta a la dosis en la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio y su rendimiento. La mayoría de los estudios antiguos tenían problemas serios de metodología que hacían difícil establecer una verdadera relación de respuesta a la dosis entre la cantidad de carbohidratos ingeridos y el rendimiento. Hasta hace pocos años, la conclusión parecía ser que se necesitaba una cantidad mínima de carbohidratos (probablemente, unos 20 gramos por hora según un estudio), pero en general se asumía que no había ninguna relación con la respuesta a la dosis (Rodríguez et al., 2009). Sin embargo, en aquella época no había buenos estudios relacionados con la respuesta a la dosis.

Más recientemente se han ido acumulando pruebas de una relación de respuesta a la dosis entre las tasas de ingestión de carbohidratos, las tasas de oxidación exógena de carbohidratos y el rendimiento. En un cuidadoso estudio reciente, se midieron el rendimiento de resistencia y la selección de combustible durante un ejercicio prolongado mientras se ingería glucosa (15, 30 y 60 g/h) (Smith, Zachwieja, Peronnet et al., 2010). Doce sujetos pedalearon durante 2 horas al 77 % VO₂ pic, y seguidamente realizaron una prueba cronometrada de 20 km. Los resultados sugerían una relación entre la dosis de glucosa ingerida y las mejoras en el rendimiento de resistencia. La oxidación exógena de glucosa aumentaba con la tasa de ingestión y es posible que el aumento de la oxidación exógena de carbohidratos esté directamente relacionada con el rendimiento del ejercicio, o que incluso sea responsable.

Un estudio multicentro a gran escala realizado por Smith, Zachwieja, Horswill et al. (2010) también analizó la relación entre la tasa de ingestión de carbohidratos y el rendimiento en la prueba cronometrada de ciclismo, para identificar una gama de tasas de ingestión de carbohidratos que mejorara el rendimiento. En dicho estudio, realizado en 4 centros de investigación, 51 ciclistas y triatletas completaron cuatro sesiones de ejercicios de 2 horas, a carga constante y con una intensidad de moderada a alta. Se compararon doce bebidas diferentes (constituidas por glucosa: fructosa en una proporción de 2:1) y se ofrecieron a los participantes 12 dosis diferentes de carbohidratos, de

10 to 120 g carbohydrate/h during the constant load ride. The carbohydrates used were multiple transportable carbohydrates (glucose:fructose). At all four sites, a common placebo that was artificially sweetened, colored, and flavored and did not contain carbohydrate was provided. The order of the beverage treatments was randomized at each site (3 at each site). Immediately following the constant load ride, participants completed a computer simulated 20-km time trial as quickly as possible. The ingestion of carbohydrate significantly improved performance in a dose dependent manner and the authors concluded that the greatest performance enhancement was seen at an ingestion rate between 60-80 g carbohydrate/h. Interestingly, these results are in line with an optimal carbohydrate intake proposed by a recent meta-analysis (Vandenbogaerde & Hopkins, 2010).

Based on the studies mentioned above carbohydrate intake recommendation for more prolonged exercise can be formulated and are listed in newly proposed guidelines in Figure 1.

Training status

A question that often arises is whether the results of these studies (often conducted in trained or even very well trained individuals) may translate to less trained or untrained individuals. A few studies compared a group of trained individuals with untrained. No differences were found in exogenous carbohydrate oxidation between trained and untrained (Jeukendrup, Mensink, Saris, & Wagenmakers, 1997; Van Loon, Jeukendrup, Saris, & Wagenmakers, 1999).

It is possible that there is an absolute exercise intensity below which exogenous oxidation rates are lower and this may be more important than the training status of the athlete. It is unlikely that the runner who completes the marathon in 5 h would need an intake of 90 carbohydrate per hour as this would be close to, or could even exceed, the total carbohydrate use, at that absolute exercise intensity.

los 10 a los 120 g de carbohidratos/hora, durante la prueba de carga constante. Los carbohidratos utilizados fueron carbohidratos múltiples transportables (glucosa:fructosa). En los cuatro centros de investigación se suministró también un placebo común, al que se le había añadido artificialmente dulzor, color y sabor, y que no contenía carbohidratos. El orden de los tratamientos con bebidas fue aleatorio a cada centro (3 en cada centro). Inmediatamente después de la prueba de carga constante, los participantes tuvieron que completar una prueba cronometrada de 20 km simulada por ordenador, tan rápido como fuera posible. La ingestión de carbohidratos mejoró significativamente el rendimiento en función de la dosis y los autores concluyeron que el mejor rendimiento se produjo con una tasa de ingestión de entre 60 y 80 g de carbohidratos/hora. Resulta interesante que estos resultados concuerden con la ingestión óptima de carbohidratos propuesta en un metaanálisis reciente (Vandenbogaerde & Hopkins, 2010).

A partir de los estudios mencionados anteriormente, se puede formular una recomendación de ingesta de carbohidratos para un ejercicio más prolongado, que incluimos en las nuevas directrices de la figura 1.

Nivel de entrenamiento

Una cuestión que surge a menudo es si los resultados de estos estudios (realizados a menudo con personas que hacen entrenamiento o mucho entrenamiento) se pueden aplicar a personas menos entrenadas o sin entrenamiento. Algunos estudios han comparado un grupo de personas con entrenamiento con un grupo de personas sin entrenamiento. No se encontraron diferencias en la oxidación exógena de carbohidratos entre unas y otras (Jeukendrup, Mensink, Saris, & Wagenmakers, 1997; Van Loon, Jeukendrup, Saris, & Wagenmakers, 1999).

Es posible que haya una intensidad de ejercicio absoluta por debajo de la cual las tasas de oxidación exógena son más bajas y esto puede ser más importante que el nivel de entrenamiento del atleta. Es poco probable que el corredor que termina una maratón en 5 horas necesite una ingestión de 90 g de carbohidratos por hora, ya que esta cifra sería similar o incluso superior al uso total de carbohidratos con aquella intensidad absoluta de ejercicio.

Effect of body weight

The guidelines for carbohydrate intake during exercise, presented here, are expressed in grams per hour of exercise and that these figures are not corrected for body mass. In the most recent position statement by the American Dietetics Association (ADA) and ACSM (Rodríguez et al., 2009), advice with respect to carbohydrate intake during exercise is expressed in g/kg. The rationale for this was unclear as there appears to be no correlation between body mass and exogenous carbohydrate oxidation (Jeukendrup, 2010). The reason, for this lack of correlation between body weight and exogenous carbohydrate oxidation, is probably that the limiting factor is carbohydrate absorption and absorption is largely independent of body mass. It is likely, however, that the absorptive capacity of the intestine is modified by carbohydrate content of the diet as it has been shown in animal studies that intestinal transporters can be upregulated with increased carbohydrate intake. Since exogenous carbohydrate is independent of body mass or muscle mass, but dependent on absorption and to some degree the absolute exercise intensity (at very low absolute intensities, low carbohydrate rates may also restrict exogenous carbohydrate oxidation), the advice given to athletes should be in absolute amounts. These results clearly show that there is no rationale for expressing carbohydrate recommendations for athletes per kilogram body mass (Figure 1).

In summary, individual differences in exogenous carbohydrate oxidation exist, although they are generally small. These differences are not related to body mass but more likely to a capacity to absorb carbohydrates. This in turn could be diet related.

Training the gut

Since the absorption of carbohydrate limits exogenous carbohydrate oxidation, and exogenous carbohydrate oxidation seems to be linked with exercise performance, an obvious potential strategy would be to increase the absorptive capacity of the

Efecto del peso corporal

Las directrices para la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio que presentamos en este artículo se expresan en gramos por hora de ejercicio. Estas cifras no tienen en cuenta la masa corporal. En la declaración más reciente de la Asociación Americana de Dietética (ADA) y del ACSM (Rodríguez et al., 2009), los consejos respecto de la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio se expresan en g/kg. La base de este método es poco clara, ya que no parece que haya correlación entre la masa corporal y la oxidación exógena de carbohidratos (Jeukendrup, 2010). La razón de esta falta de correlación entre el peso corporal y la oxidación exógena de carbohidratos es probablemente el hecho de que el factor limitador de la absorción de carbohidratos es independiente de la masa corporal. Sin embargo, es probable que el contenido en carbohidratos de la dieta modifique la capacidad de absorción del intestino, ya que en estudios con animales se ha demostrado que los transportadores intestinales se pueden regular aumentando la ingestión de carbohidratos. Como la oxidación exógena de carbohidratos no depende de la masa corporal ni muscular, sino de la absorción y, hasta cierto punto, de la intensidad absoluta del ejercicio (con intensidades absolutas muy bajas, tasas bajas de carbohidratos también pueden limitar la oxidación exógena de carbohidratos), la cantidad recomendada para los atletas debería expresarse en cifras absolutas. Estos resultados demuestran claramente que no hay ninguna razón para expresar las recomendaciones relativas a carbohidratos para los atletas en kilogramos de masa corporal (figura 1).

En resumen, las diferencias individuales en cuanto a la oxidación exógena de carbohidratos existen, aunque generalmente son muy pequeñas. Estas diferencias no están relacionadas con la masa corporal, sino más bien con la capacidad de absorber los carbohidratos. Y este hecho, a su vez, podría estar relacionado con la dieta.

Entrenar al intestino

Como la absorción de carbohidratos limita la oxidación exógena de carbohidratos, y la oxidación exógena de carbohidratos parece que está relacionada con el rendimiento durante el ejercicio, una estrategia potencial obvia sería aumentar la capacidad de absorción del intestino. Las pruebas

gut. Anecdotal evidence in athletes would suggest that the gut is trainable and that individuals who regularly consume carbohydrate or have a high daily carbohydrate intake may also have an increased capacity to absorb it. Intestinal carbohydrate transporters can indeed be upregulated by exposing an animal to a high carbohydrate diet (Ferraris, 2001). To date there is limited evidence in humans. A recent study by Cox et al. (2010) investigated whether altering daily carbohydrate intake affects substrate oxidation and in particular exogenous carbohydrate oxidation. It was demonstrated that exogenous carbohydrate oxidation rates were higher after the high carbohydrate diet (6.5 g/kg bodyweight/day; 1.5 g/kg BW provided mainly as a carbohydrate supplement during training) for 28 days compared with a control diet (5 g/kg bodyweight/day). This study provided evidence that the gut is indeed adaptable and this can be used as a practical method to increase exogenous carbohydrate oxidation. We recently suggested that this may be highly relevant to the endurance athlete and may be a prerequisite for the first person to break the 2h marathon barrier (Stellingwerff & Jeukendrup, 2011). Although more research is needed, it is recommended to practice the carbohydrate intake strategy in training, and dedicate at least some training to training with a relatively high carbohydrate intake.

Carbohydrate intake in real life events

Relatively few studies have investigated how much carbohydrate athletes ingest during races and whether they meet the guidelines. In a study by Kimber, Ross, Mason and Speedy (2002) the average carbohydrate intake during an Ironman distance triathlon was 1.0 g/kg BW/h in female triathletes and 1.1 g/kg BW/h in male triathletes. They achieved these carbohydrate intakes by ingesting very large amounts of carbohydrate during cycling (approximately 1.5 g/kg BW/h). Most of the intake occurred during the cycling leg where intake was almost 3 times as high as during running leg. In male athletes carbohydrate intake

anecdóticas en atletas sugieren que el intestino se puede entrenar y que aquellas personas que consumen regularmente carbohidratos o que ingieren grandes cantidades diarias de carbohidratos pueden aumentar su capacidad para absorberlos. Los transportadores intestinales de carbohidratos se pueden regular si se expone un animal a una dieta elevada en carbohidratos (Ferraris, 2001). Hoy en día, todavía se han hecho pocas pruebas en humanos. Un estudio reciente realizado por Cox et al. (2010) investigaba si la alteración de la ingesta diaria de carbohidratos afecta la oxidación del sustrato y, en particular, la oxidación exógena de carbohidratos. Se demostró que las tasas de oxidación exógena de carbohidratos eran mayores después de una dieta elevada en carbohidratos (6,5 g/kg de peso corporal por día; 1,5 g/kg de peso corporal suministrado principalmente en forma de suplemento de carbohidratos durante el entrenamiento) durante 28 días, en comparación con una dieta de control (5 g/kg de peso corporal por día). Este estudio demostraba que el intestino es adaptable y, por tanto, que se puede utilizar como método práctico para aumentar la oxidación exógena de carbohidratos. Hace poco hemos sugerido que este hecho puede ser muy relevante para los atletas de resistencia y que puede ser un requisito previo para la primera persona en romper la barrera de 2 horas de la maratón (Stellingwerff & Jeukendrup, 2011). Aunque se requiere más investigación, se recomienda practicar la estrategia de la ingestión de carbohidratos durante el entrenamiento y dedicar algún tiempo al entrenamiento con ingestas relativamente elevadas de carbohidratos.

Ingestión de carbohidratos en pruebas reales

Relativamente pocos estudios han investigado la cantidad de carbohidratos que ingieren los atletas durante las carreras y si los valores están de acuerdo con las directrices. En un estudio elaborado por Kimber, Ross, Mason y Speedy (2002) la ingesta media de carbohidratos durante una distancia *ironman* de triatlón fue de 1,0 g/kg de peso corporal/h en el caso de las mujeres y de 1,1 g/kg de peso corporal/h en el caso de los hombres. Los atletas lograron estos valores ingiriendo grandes cantidades de carbohidratos durante el segmento de ciclismo (aproximadamente, 1,5 g/kg de peso corporal/h). La mayor parte de la ingestión tuvo lugar durante el segmento de ciclismo, en el que fue casi tres veces superior a la del segmento de carrera. En los atletas masculinos la

was positively correlated with finish time but this relationship could not be confirmed in females. A large study of endurance events by Pfeiffer et al. (2012), demonstrated wide variation in carbohydrate intake reported by athletes between and within events, with highest intakes in cycling and triathlon events and lowest in marathons. In this study it was also found that in Ironman races carbohydrate intake was related to finish time with greater carbohydrate intake correlating to better performance. These findings appear to be in agreement with the recent dose response studies by Smith, Pascoe et al. (2012) and Smith, Zachwieja et al. (2010).

Different advice for different endurance sports

With carbohydrate feeding during cycling it has repeatedly been shown that muscle glycogen breakdown is unaffected. During running, however, there are suggestions that muscle glycogen breakdown is reduced in particular in type I muscle fibres (Tsintzas, Williams, Boobis, & Greenhaff, 1995). Therefore carbohydrate feeding results in improved performance in cycling and running, although the mechanism by which this occurs may not necessarily be the same. This issue is discussed in more detail in an excellent review by Tsintzas and Williams (1998). Exogenous carbohydrate oxidation appears to be similar in cycling and running (Pfeiffer, Stellingwerff, Zaltas, Hodgson, & Jeukendrup, 2011) suggesting that the advice for cyclists and runners is not different.

Intermittent and skill sports

The vast majority of studies has been performed with endurance athletes performing continuous exercise. Most team sports have a highly intermittent nature with bursts of very high intensity exercise followed by relatively low intensity recovery periods. Besides this, performance in these sports is often dependent on other factors

ingestión de carbohidratos se relacionó positivamente con el tiempo final, pero esta relación no se pudo confirmar en las atletas femeninas. Un amplio estudio sobre pruebas de resistencia realizado por Pfeiffer et al. (2012) mostró una gran variación en la ingestión de carbohidratos de los atletas entre pruebas y durante las mismas. Las ingestiones mayores tuvieron lugar en pruebas de ciclismo y de triatlón, y las más bajas, en maratones. En este estudio también se descubrió que en las carreras *ironman* la ingestión de carbohidratos estaba relacionada con el tiempo final y que los atletas con ingestas superiores de carbohidratos conseguían el mejor rendimiento. Estos resultados parecen concordar con los estudios recientes sobre respuesta a la dosis de Smith, Pascoe et al. (2012) y Smith, Zachwieja et al. (2010).

Diferente asesoramiento para diferentes deportes de resistencia

Con la ingestión de carbohidratos durante las pruebas de ciclismo se ha demostrado repetidamente que la descomposición del glucógeno muscular no se ve afectada. Al correr, en cambio, hay indicios que sugieren que la descomposición del glucógeno muscular se reduce, particularmente en las fibras musculares de tipo I (Tsintzas, Williams, Boobis, & Greenhaff, 1995). Así pues, la ingestión de carbohidratos ayuda a conseguir un mejor rendimiento en ciclismo y en carreras, aunque el mecanismo que lo hace posible no es necesariamente el mismo. Este tema se trata con más detalle en un artículo de revisión excelente de Tsintzas y Williams (1998). La oxidación exógena de carbohidratos parece que es similar en el ciclismo y en carreras (Pfeiffer, Stellingwerff, Zaltas, Hodgson, & Jeukendrup, 2011), lo que sugiere que las recomendaciones para los ciclistas y los corredores no deben ser diferentes.

Deportes intermitentes y de habilidad

La gran mayoría de estudios se ha llevado a cabo con atletas de resistencia haciendo un ejercicio continuo. La mayoría de equipos deportivos tienen una naturaleza altamente intermitente, con ráfagas de ejercicio de intensidad muy elevada seguidos de períodos de recuperación de intensidad relativamente baja. Además, el rendimiento en estos deportes de equipo a menudo depende de otros factores que no

than maintenance of speed or power and factors like agility, timing, motor skill, decision making, jumping, and sprinting may all play a role. Nevertheless, carbohydrate ingestion during exercise has also been shown to enhance endurance capacity in intermittent activities. A large number of studies have demonstrated that if carbohydrate is ingested during intermittent running, fatigue can be delayed and time to exhaustion can be increased (Davison et al., 2008; Foskett, Williams, Boobis, Tsintzas, 2008; Nicholas, Nuttall, & Williams, 2000; Nicholas, Williams, Lakomy, Phillips, & Nowitz, 1995; Patterson & Gray, 2007).

More recently, studies have incorporated measurements of skill into their performance measurements. Currell, Conway and Jeukendrup (2009) developed a 90 min soccer simulation protocol that included measurements of skill, such as agility, dribbling, shooting and heading. The soccer players performed 90 min of intermittent exercise that mimicked their movement patterns during a game. During the 90 min, skill performance measurements were performed at regular intervals. Agility, dribbling and accuracy of shooting were all improved but heading was not affected with carbohydrate ingestion. Other studies have found similar effects (Ali, Williams, Nicholas, & Foskett, 2007). Although typically a number of the skills measured in these studies were improved with carbohydrate feeding, the mechanisms behind these improvements are unknown and have not been studied in any detail.

It appears that carbohydrate intake during team sports and other sports with an element of skill has the potential to improve not only fatigue resistance but also the skill components of a sport, especially towards the end of a game. The practical challenge is often to find ways to ingest carbohydrate during a game within the rules of the sport.

Summary

In summary, there have been significant changes in the understanding of the role of carbohydrate during exercise in recent years and this allows for more specific and more individualised advice with regards

son el mantenimiento de la velocidad o la potencia, sino que la agilidad, la coordinación, las habilidades motoras, la toma de decisiones, los saltos y el sprint, por ejemplo, pueden ser importantes. Sin embargo, también se ha demostrado que la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio mejora la capacidad de resistencia en actividades intermitentes. Un gran número de estudios ha demostrado que si se ingieren carbohidratos mientras se corre intermitentemente, la fatiga se puede retrasar y se puede aumentar el tiempo que pasa hasta llegar al agotamiento (Davison et al., 2008; Foskett, Williams, Boobis, Tsintzas, 2008; Nicholas, Nuttall, & Williams, 2000; Nicholas, Williams, Lakomy, Phillips, & Nowitz, 1995; Patterson & Gray, 2007).

Últimamente, los estudios han incorporado mediciones de las habilidades a las mediciones que se realizan sobre el rendimiento. Currell, Conway and Jeukendrup (2009) desarrollaron un protocolo de simulación de fútbol de 90 minutos que incluía mediciones de habilidades como la agilidad, el regate, el tiro y el cabezazo. Los futbolistas realizaron 90 minutos de ejercicio intermitente que simulaba sus patrones de movimiento durante un partido. Durante los 90 minutos se midieron las habilidades a intervalos regulares. La agilidad, el regate y la precisión del disparo mejoraron, pero el cabezazo no se vio afectado por la ingestión de carbohidratos. Otros estudios han descubierto efectos similares (Ali, Williams, Nicholas, & Foskett, 2007). Aunque, normalmente, algunas de las habilidades medidas en estos estudios mejoraron gracias a la ingestión de carbohidratos, los mecanismos causantes de estas mejoras aún no se conocen y no se han estudiado con detalle.

Parece que la ingestión de carbohidratos durante la práctica de deportes de equipo y otros deportes que requieren habilidad tiene el potencial de mejorar no sólo la resistencia a la fatiga, sino también los componentes de habilidad del deporte, especialmente hacia el final del partido. El reto práctico suele ser encontrar maneras de ingerir carbohidratos durante un partido sin incumplir las normas.

Resumen

En resumen, durante los últimos años se han producido cambios significativos en la comprensión del papel que juegan los carbohidratos durante el ejercicio, y estos cambios permiten realizar un asesoramiento más específico y más

to carbohydrate ingestion during exercise. The new guidelines proposed take into account the duration (and intensity) of exercise and advice is not restricted to the amount of carbohydrate, it also gives direction with respect to the type of carbohydrate. The recommendations presented here are derived mostly from studies with trained and well-trained athletes. Athletes who perform at absolute intensities that are lower will have lower carbohydrate oxidation rates and the amounts presented here should be adjusted (downwards) accordingly. The recommended carbohydrate intake can be achieved by consuming drinks, gels of low fat, low protein and low fibre solid foods (bars) and selection should be determined by personal preference. Athletes can adopt a mix and match strategy to achieve their carbohydrate intake goals. However, the carbohydrate intake should be balanced with a fluid intake plan and it must be noted that solid foods and highly concentrated carbohydrate solutions have been shown to reduce fluid absorption. Although, a slowing of gastric emptying and absorption can partly be prevented by using multiple transportable carbohydrates, this is something the athlete needs to consider when developing their nutrition strategy. Although more research is needed, it is highly recommended to train the nutrition strategy to reduce the chances of gastro-intestinal discomfort and to increase the absorptive capacity of the intestine.

Finally it must be noted that most studies are based on findings in runners and cyclist and more work is needed to establish the effects and underlying mechanisms of carbohydrate ingestion on skill components in intermittent team sports.

Disclaimer

The Gatorade Sports Science Institute is a division of PepsiCo Inc. The view expressed in the article are the views of the author and do not necessarily reflect the position or policy of PepsiCo Inc.

individualizado en cuanto a la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio. Las nuevas directrices propuestas tienen en cuenta la duración (y la intensidad) del ejercicio y el asesoramiento no se limita a la cantidad de carbohidratos, sino que también propone el tipo de estos. Las recomendaciones que se presentan en este artículo derivan principalmente de los estudios realizados con atletas entrenados y muy entrenados. Los atletas que trabajen a intensidades absolutas inferiores obtendrán tasas de oxidación de carbohidratos inferiores y, por tanto, deben ajustarse a la baja las cantidades que aquí se indican. La ingesta recomendada de carbohidratos se puede lograr consumiendo bebidas, gels con pocas grasas o alimentos sólidos bajos en proteínas y en fibra (barritas) y la elección debe basarse en las preferencias personales. Los atletas pueden utilizar una mezcla de estrategias para lograr sus objetivos de ingesta de carbohidratos. Sin embargo, debe equilibrarse con un plan de ingestión de líquidos. Hay que tener en cuenta que se ha demostrado que los alimentos sólidos y las soluciones de carbohidratos altamente concentradas reducen la absorción de líquidos. Aunque se puede evitar parcialmente la ralentización del vaciado gástrico y la absorción mediante el uso de transporte múltiple de carbohidratos, se trata de algo que el atleta debe tener en cuenta a la hora de desarrollar su estrategia nutricional. Aunque se necesita investigar más, se recomienda ajustar la estrategia de nutrición para reducir las probabilidades de molestias gastrointestinales y aumentar la capacidad de absorción del intestino.

Finalmente, debe tenerse en cuenta que la mayoría de estudios se basan en descubrimientos realizados con corredores y ciclistas, por lo que se tiene que investigar más para establecer los efectos y los mecanismos subyacentes de la ingestión de carbohidratos en los componentes de habilidad de deportes intermitentes de equipo.

Descargo de responsabilidad

El Instituto Gatorade de Ciencias del Deporte es una división de PepsiCo Inc. Los puntos de vista que se expresan en este artículo son los del autor y pueden no representar la postura o la política de PepsiCo Inc.

References / Referencias

- Ali, A., Williams, C., Nicholas, C. W., & Foskett, A. (2007). The influence of carbohydrate-electrolyte ingestion on soccer skill performance. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 39, 1969-1976. doi:10.1249/mss.0b013e31814fb3e3
- Bergstrom, J., & Hultman E. (1966). Muscle glycogen synthesis after exercise: An enhancing factor localized in muscle cells in man. *Nature*, 210, 309-310. dx.doi.org/10.1038/210309a0
- Chambers, E. S., Bridge, M. W., & Jones, D. A. (2009). Carbohydrate sensing in the human mouth: effects on exercise performance and brain activity. *The Journal of Physiology*, 587, 1779-1794. doi:10.1113/jphysiol.2008.164285
- Christensen, E. H., & Hansen, O. (1939). Arbeitsfähigkeit und Ernährung. *Skandinavisches Archiv Für Physiologie*, 81, 160-171. doi:10.1111/j.1748-1716.1939.tb01320.x
- Coggan, A. R., & Coyle, E. F. (1987). Reversal of fatigue during prolonged exercise by carbohydrate infusion or ingestion. *Journal of Applied Physiology*, 63, 2388-2395.
- Cox, G. R., Clark, S. A., Cox, A. J., Halson, S. L., Hargreaves, M., Hawley, ... Burke, L. M. (2010). Daily training with high carbohydrate availability increases exogenous carbohydrate oxidation during endurance cycling. *Journal of Applied Physiology*, 109, 126-134. doi:10.1152/jappphysiol.00950.2009
- Coyle, E. F., Hagberg, J. M., Hurlley, B. F., Martin, W. H., Ehsani, A. A., & Holloszy, J. O. (1983). Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise. *Journal of Applied Physiology*, 55, 230-235.
- Currell, K., Conway, S., & Jeukendrup, A. E. (2009). Carbohydrate ingestion improves performance of a new reliable test of soccer performance. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 19, 34-46.
- Currell, K., & Jeukendrup, A. E. (2008). Superior endurance performance with ingestion of multiple transportable carbohydrates. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40, 275-281. doi:10.1249/mss.0b013e31815adf19
- Davison, G. W., McClean, C., Brown, J., Madigan, S., Gamble, D., Trinick, T., & Duly, E. (2008). The effects of ingesting a carbohydrate-electrolyte beverage 15 minutes prior to high-intensity exercise performance. *Research in Sports Medicine*, 16, 155-166. doi:10.1080/15438620802103155
- Ferraris, R. P. (2001). Dietary and developmental regulation of intestinal sugar transport. *Biochemical Journal*, 360, 265-276. doi:10.1042/0264-6021:3600265
- Fielding, R. A., Costill, D. L., Fink, W. J., King, D. S., Hargreaves, M., & Kowaleski, J. E. (1985). Effect of carbohydrate feeding frequencies and dosage on muscle glycogen use during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 17, 472-476. doi:10.1249/00005768-198508000-00012
- Foskett, A., Williams, C., Boobis, L., & Tsintzas, K. (2008). Carbohydrate availability and muscle energy metabolism during intermittent running. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 40, 96-103. doi:10.1249/mss.0b013e3181586b2c
- Gant, N., Stinear, C. M., & Byblow, W. D. (2010). Carbohydrate in the mouth immediately facilitates motor output. *Brain Research*, 1350, 151-158. doi:10.1016/j.brainres.2010.04.004
- Hulston, C. J., Wallis, G. A., & Jeukendrup, A. E. (2009). Exogenous CHO oxidation with glucose plus fructose intake during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41, 357-363. doi:10.1249/MSS.0b013e3181857ee6
- Jentjens, R. L., Moseley, L., Waring, R. H., Harding, L. K., & Jeukendrup, A. E. (2004). Oxidation of combined ingestion of glucose and fructose during exercise. *Journal of Applied Physiology*, 96, 1277-1284. doi:10.1152/jappphysiol.00974.2003
- Jeukendrup, A. E. (2004). Carbohydrate intake during exercise and performance. *Nutrition*, 20, 669-677. doi:10.1016/j.nut.2004.04.017
- Jeukendrup, A. E. (2008). Carbohydrate feeding during exercise. *European Journal of Sport Science*, 8, 77-86.
- Jeukendrup, A. E. (2010). Carbohydrate and exercise performance: the role of multiple transportable carbohydrates. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 13, 452-457. doi:10.1097/MCO.0b013e328339de9f
- Jeukendrup, A. E. (2011). Nutrition for endurance sports: marathon, triathlon, and road cycling. *Journal of Sports Sciences*, 29 (Suppl 1), S91-99. doi:10.1080/02640414.2011.610348
- Jeukendrup, A. E., & Chambers, E. S. (2010). Oral carbohydrate sensing and exercise performance. *Current Opinion in Clinical Nutrition & Metabolic Care*, 13, 447-451. doi:10.1097/MCO.0b013e328339de83
- Jeukendrup, A. E., & Jentjens, R. (2000). Oxidation of carbohydrate feedings during prolonged exercise: Current thoughts, guidelines and directions for future research. *Sports Medicine*, 29, 407-424. doi:10.2165/00007256-200029060-00004
- Jeukendrup, A. E., & McLaughlin, J. (2011). Carbohydrate ingestion during exercise: effects on performance, training adaptations and trainability of the gut. *Nestle Nutrition Institute Workshop Series*, 69, 1-12; discussion 13-17. doi:10.1152/jappphysiol.00974.2003
- Jeukendrup, A. E., Mensink, M., Saris, W. H., & Wagenmakers, A. J. (1997). Exogenous glucose oxidation during exercise in endurance-trained and untrained subjects. *Journal of Applied Physiology*, 82, 835-840.
- Jeukendrup, A. E., Moseley, L., Mainwaring, G. I., Samuels, S., Perry, S., & Mann, C. H. (2006). Exogenous carbohydrate oxidation during ultraendurance exercise. *Journal of Applied Physiology*, 100, 1134-1141. doi:10.1152/jappphysiol.00981.2004
- Kimber, N. E., Ross, J. J., Mason, S. L., & Speedy, D. B. (2002). Energy balance during an ironman triathlon in male and female triathletes. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 12, 47-62.
- Krogh, A., & Lindhard, J. (1920). The relative value of fat and carbohydrate as sources of muscular energy. *Biochemical Journal*, 14, 290-363.
- Maughan, R. J., Bethell, L. R., & Leiper, J. B. (1996). Effects of ingested fluids on exercise capacity and on cardiovascular and metabolic responses to prolonged exercise in man. *Experimental Physiology*, 81, 847-859.
- Nicholas, C. W., Nuttall, F. E., & Williams, C. (2000). The Loughborough Intermittent Shuttle Test: a field test that simulates the activity pattern of soccer. *Journal of Sports Sciences*, 18, 97-104. doi:10.1080/026404100365162
- Nicholas, C. W., Williams, C., Lakomy, H. K., Phillips, G., & Nowitz, A. (1995). Influence of ingesting a carbohydrate-electrolyte solution on endurance capacity during intermittent, high-intensity shuttle running. *Journal of Sports Sciences*, 13, 283-290. doi:10.1080/02640419508732241
- Patterson, S. D., & Gray, S. C. (2007). Carbohydrate-gel supplementation and endurance performance during intermittent high-intensity shuttle running. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 17, 445-455.
- Pfeiffer, B., Stellingwerff, T., Hodgson, A. B., Randell, R., Poettgen, K., Res, P., & Jeukendrup, A. E. (2012). Nutritional intake and gastrointestinal problems during competitive endurance events. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 44(2), 344-351. doi:10.1249/MSS.0b013e31822dc809
- Pfeiffer, B., Stellingwerff, T., Zaltas, E., Hodgson, A. B., & Jeukendrup, A. E. (2011). Carbohydrate oxidation from a drink during

- running compared with cycling exercise. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 43, 327-334. doi:10.1249/MSS.0b013e3181ebc488
- Pfeiffer, B., Stellingwerff, T., Zaltas, E., & Jeukendrup A. E. (2010a). CHO oxidation from a CHO gel compared with a drink during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42, 2038-2045. doi:10.1249/MSS.0b013e31822dc809
- Pfeiffer, B., Stellingwerff, T., Zaltas, E., & Jeukendrup, A. E. (2010b). Oxidation of solid versus liquid CHO sources during exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42, 2030-2037. doi:10.1249/MSS.0b013e3181e0efc9
- Rodríguez, N. R., Di Marco, N. M., & Langley, S. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Nutrition and athletic performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41, 709-731. doi:10.1249/MSS.0b013e31890eb86
- Rowlands, D. S., Swift, M., Ros, M., & Green, J. G. (2012). Composite versus single transportable carbohydrate solution enhances race and laboratory cycling performance. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 37, 425-436. doi:10.1139/h2012-013
- Rowlands, D. S., Thorburn, M. S., Thorp, R. M., Broadbent, S., & Shi, X. (2008). Effect of graded fructose coingestion with maltodextrin on exogenous ¹⁴C-fructose and ¹³C-glucose oxidation efficiency and high-intensity cycling performance. *Journal of Applied Physiology*, 104, 1709-1719. doi:10.1152/jappphysiol.00878.2007
- Sawka, M. N., Burke, L. M., Eichner, E. R., Maughan, R. J., Montain, S. J., & Stachenfeld, N. S. (2007). American College of Sports Medicine position stand. Exercise and fluid replacement. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39, 377-390. doi:10.1249/mss.0b013e31802ca597
- Smith, J. W., Pascoe, D. D., Pässe, D. H., Ruby, B. C., Stewart, L. K., Baker, L. B., & Zachwieja, J. J. (2013). Curvilinear Dose-Response Relationship of Carbohydrate (0-120 g*h⁻¹) and Performance. *Medicine & Science in Sport & Exercise*, 45(2):336-4. doi:10.1249/MSS.0b013e31827205d1
- Smith, J. W., Zachwieja, J. J., Horswill, C. A., Pascoe, D. D., Pässe, D., Ruby, B. C., & Stewart, L. K. (2010). Evidence of a Carbohydrate Dose and Prolonged Exercise Performance Relationship. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42, 84. doi:10.1249/01.MSS.0000385615.40977.c3
- Smith, J. W., Zachwieja, J. J., Peronnet, F., Pässe, D. H., Massicotte, D., Lavoie, C., & Pascoe, D. D. (2010). Fuel selection and cycling endurance performance with ingestion of [¹³C]glucose: evidence for a carbohydrate dose response. *Journal of Applied Physiology*, 108, 1520-1529. doi:/10.1152/jappphysiol.91394.2008
- Stellingwerff, T., & Jeukendrup, A. E. (2011). Authors reply to Viewpoint by Joyner et al. entitled "The Two-Hour Marathon: Who and When?" *Journal of Applied Physiology*, 110, 278-293. doi:10.1152/jappphysiol.01259.2010
- Triplett, D., Doyle, J. A., Rupp, J. C., & Benardot, D. (2010). An isocaloric glucose-fructose beverage's effect on simulated 100-km cycling performance compared with a glucose-only beverage. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 20, 122-131.
- Tsintzas, O. K., & Williams, C. (1998). Human muscle glycogen metabolism during exercise: effect of carbohydrate supplementation. *Sports Medicine*, 25, 7-23. doi:10.2165/00007256-199825010-00002
- Tsintzas, O. K., Williams, C., Boobis, L., & Greenhaff, P. (1995). Carbohydrate ingestion and glycogen utilisation in different muscle fibre types in man. *The Journal of Physiology*, 489, 243-250.
- Van Loon, L. J., Jeukendrup, A. E., Saris, W. H., & Wagenmakers, A. J. (1999). Effect of training status on fuel selection during submaximal exercise with glucose ingestion. *Journal of Applied Physiology*, 87, 1413-1420.
- Vandenbogaerde, T. J., & Hopkins, W.G. (2010). Monitoring acute effects on athletic performance with mixed linear modeling. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42, 1339-1344.