PubliCE, (PubliCE) 1993

Revision of Literature

Suplementación de Carbohidratos durante el Ejercicio

Edward F Coyle[1]

[1]*Performance Laboratory, Department of Kinesiology and Health, University of Texas at Austin, Austin, TX.*

RESUMEN

El glucógeno muscular y la glucosa del plasma son oxidados por el músculo esquelético para proveer la energía de los carbohidratos necesaria para realizar ejercicio enérgicamente durante varias horas (por ejemplo, al 70 % del consumo máximo de O_2). Al incrementarse la duración del ejercicio hay un cambio progresivo del aporte de glucógeno muscular hacia la glucosa de la sangre. La concentración de glucosa en la sangre declina hasta niveles de hipoglicemia (por ejemplo, 2.5 mmol/1), en ciclistas bien entrenados después de ± 3 h de ejercicio y esto parece causar fatiga muscular al reducir la contribución de glucosa de la sangre al metabolismo de oxidación. La alimentación con carbohidratos durante el ejercicio retrasa la fatiga de 30 a 60 min, aparentemente al mantener la concentración de glucosa de la sangre y el porcentaje de oxidación de carbohidratos necesarios para ejercitarse enérgicamente. Los alimentos carbohidratados no ahorran la utilización de glucógeno muscular. Se usa muy poco glucógeno muscular para la producción de energía energía, durante un período de 3 - 4 hs de ejercicio prolongado, cuando se ingirieron carbohidratos, sugiriendo que la glucosa de la sangre es la fuente predominante de carbohidratos. En este momento, el suministro de glucosa exógena excede 1 g/min (por ejemplo, l6 mg/kg/min), como lo evidencia la observación de que una infusión intravenosa de glucosa a esta tasa, es requerida para mantener la glucosa de la sangre a 5 mmol/L. De todos modos, en ese momento, este grupo de ciclistas no pueden ejercitarse más intensamente que al 74 % de su consumo máximo de O_2, sugiriendo un límite para la tasa a la cual la glucosa de la sangre puede ser usada para energía. Es importante darse cuenta que la suplementación carbohidratada durante el ejercicio retrasa la fatiga por 30-60 min, pero no previene la fatiga. En conclusión, la fatiga durante el ejercicio exhaustivo prolongado se debe, a menudo, a una inadecuada oxidación de carbohidratos. Esto es, en parte, el resultado de una hipoglicemia, lo cual limita la oxidación de carbohidratos y causa fatiga muscular. El suministro de carbohidratos durante el ejercicio exhaustivo mantiene la oxidación de glucosa de la sangre y retrasa la fatiga por 30-60 min, pero no previene la fatiga, la cual eventualmente resulta a causa de otros factores, hasta ahora desconocidos.

Palabras Clave: ejercicio, carbohidratos, fatiga, glucógeno, hipoglicemia

INTRODUCCIÓN

A comienzos de siglo se estableció que tanto las grasas como los carbohidratos se oxidaban para producir energía durante el ejercicio (1). Trabajos posteriores demostraron que la contribución relativa de los carbohidratos y las grasas para la energía depende de la duración y la intensidad del ejercicio, tanto como de la dieta pre-ejercicio y del estado de entrenamiento físico (2, 4).

Estudios anteriores se refirieron en relación a la medición de la concentración de glucosa de la sangre y/o la variación del cociente respiratorio (R) para evaluar el metabolismo de los carbohidratos durante el ejercicio y su relación con la fatiga. El metabolismo de los carbohidratos durante el ejercicio fue, típicamente, manipulado al alterar la dieta, tanto antes o durante el ejercicio.

Dill y cols. (5), por ejemplo, estudiaron los efectos de la ingestión de carbohidratos sobre la performance de carrera, en un perro entrenado para correr a una intensidad dada, en una cinta en el laboratorio. Luego de una noche de ayuno, el perro fue capaz de correr por 3-6 hs antes de fatigarse, lo cual coincidió con una marcada disminución de la concentración de glucosa de la sangre. Cuando se lo alimentó con carbohidratos antes y durante el ejercicio, sin embargo, el perro fue capaz de correr igual o más de 13 hs antes de fatigarse. En otro experimento realizado después de una noche de ayuno, el perro corrió por un periodo >4 hs antes de fatigarse, en el momento en que la concentración de glucosa en sangre era de 2.6 mmol/L. En este punto, al perro se le dieron 40 g de azúcar para comer. Subsecuentemente la glucosa de la sangre incrementó a > 6 mmol/L, y el perro fue capaz de ejercitar por otra hora y media. Estas observaciones llevaron a Dill y cols. (5) a la conclusión de que el factor limitarte en la performance de ejercicio prolongado "...parece ser meramente la cantidad de combustible fácilmente disponible", en forma de glucosa de origen sanguíneo. Ellos concluyeron que la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio retrasaba la fatiga, al mantener la provisión de carbohidratos para su oxidación por los músculos.

En contraste con estas observaciones en el perro, anteriores estudios con humanos se concentraron sobre los efectos de la alteración de la concentración de glucosa en sangre sobre el sistema nervioso central. En 1924, Levine y cols. (6) observaron que algunos corredores que estaban hipoglicémicos al final de la Maratón de Boston, " ….mostraban contracturas musculares, palidez extrema, la piel fría y húmeda, irritabilidad nerviosa, y hasta estados de postración extrema, depresión y pérdida de conciencia". Se previnieron estos síntomas y se reportaron mejorías en la performance de la carrera cuando estos mismos sujetos consumieron carbohidratos adicionales, en los días anteriores, y durante la carrera del año siguiente (7). La ingestión de carbohidratos durante el ejercicio fue, por lo tanto, considerada como factor que incrementaba la performance, primariamente, al prevenir tales síntomas de neuroglucopenia. Este concepto fue reforzado por los estudios clásicos de Christensen y Hansen (8, 10). En una serie de experimentos sobre tres sujetos, ellos observaron que el consumir una dieta alta en grasas perjudicaba a la performance durante el ejercicio al 60 % del consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx.). Ellos también observaron que la fatiga durante el ejercicio, después de una dieta alta en grasas fue asociada con un R bajo durante el ejercicio, y una severa hipoglicemia, suficiente como para generar los síntomas de neuroglucopenia (8, 10). En un intento de diferenciar las posibles causas de la fatiga, dos de estos hombres fueron alimentados con 200 g de glucosa "...hasta casi el agotamiento total". Esto resultó en un rápido incremento de la concentración de glucosa en sangre y un alivio con respecto a los síntomas de la neuroglucopenia. Se revirtió la fatiga y los hombres ejercitaron por otros 60 min adicionales. De todos modos, el R, el cual fue más bajo que lo normal durante el ejercicio, a raíz de la dieta precedente, alta en grasa, no cambió significativamente, tanto antes como después de la ingestión de glucosa. Christensen y Hansen (8,10) sugieren que el desarrollo y reversión de la fatiga bajo estas condiciones de ejercicio, después de una dieta alta en grasas, no se debió a los cambios en el % de la oxidación de los carbohidratos, aunque ellos sintieron que estos resultados no descartan completamente esta posibilidad. Estas observaciones han sido la base para la idea de que la ingestión de carbohidratos durante el ejercicio, retrasa principalmente la fatiga al prevenir los síntomas de la neuroglucopenia. Como se discute más adelante, basados en recientes descubrimientos, nosotros pensamos que los síntomas de la neuroglucopenia, generalmente no causan fatiga. En lugar de ello, generalmente parece que la hipoglicemia causa fatiga muscular, probablemente, porque la misma priva a los músculos en ejercicio de la energía proveniente de los carbohidratos.

EJERCICIO EXHAUSTIVO Y LA ENERGÍA DE LOS CARBOHIDRATOS: IMPORTANCIA DEL GLUCÓGENO MUSCULAR.

De estas observaciones se desprende claramente que el ejercicio exhaustivo a intensidades que requieren >60 % del VO_2 máx. empeoran cuando falta una dieta con carbohidratos, y en general esto se asocia con un inadecuado porcentaje de oxidación de carbohidratos. La introducción de la técnica de biopsia muscular en los '60, demostró que los niveles de glucógeno muscular disminuían después de la realización de ejercicios intensos, hasta llegar a la fatiga (11). Además, la duración que un ejercicio exhaustivo enérgico podía mantenerse fue alterada, aumentando y disminuyendo los niveles de glucógeno muscular, a través de la manipulación de la dieta y el ejercicio (12). Esto nos lleva al concepto de que el glucógeno muscular es la fuente primaria de carbohidratos durante el ejercicio. Aunque esto no es incorrecto, este concepto sobresimplificado minimiza indirectamente la potencialidad de la glucosa de la sangre para ser usada como un combustible para la oxidación de los carbohidratos, durante el ejercicio al 60-80 % del VO_2 máx. Este concepto de que el glucógeno muscular es la fuente principal de energía a partir de los carbohidratos parece no estar en conflicto con las conclusiones de Christensen y Hansen (8, 10), que dicen que una glucemia baja causa fatiga debido a una neuroglucopenia, y que la elevación de la glucosa de la sangre por la alimentación con carbohidratos, revierte la fatiga eliminando la neuroglucopenia. Por lo tanto, durante el período de los '60 y los '70, había muy poco apoyo para la idea de que la glucosa de la sangre sirve como fuente principal de energía de carbohidratos, o que la fatiga durante el ejercicio se relaciona con la capacidad de la glucosa de la sangre para servir como combustible.

EJERCICIO EXHAUSTIVO Y ENERGÍA DE LOS CARBOHIDRATOS: CONTRIBUCIÓN DE LA GLUCOSA SANGUÍNEA

Informes sobre estudios conducidos durante los años '70, los cuales midieron directamente el consumo de glucosa muscular, indicaban que la glucosa de la sangre podría hacer importantes contribuciones al metabolismo energético.

Wahren y cols. (13) observaron que el consumo de glucosa de las piernas, se incrementaba durante el ejercicio de duración e intensidad aumentadas. Ahlborg y cols. (14), también reportaron que el incremento progresivo en el consumo de glucosa de las piernas ante un ejercicio de duración prolongada fue alterada debido a una declinación en la concentración de la glucosa de la sangre, secundaria a la reducción de la producción total de glucosa del hígado.

Se supuso este efecto, como resultado de una depleción del glucógeno almacenado en el hígado. Ahlborg y Felig (15), subsecuentemente, demostraron que cuando la concentración de glucosa de la sangre fue mantenida a través del ejercicio, por la ingestión de glucosa, el consumo de glucosa de las piernas se mantuvo a altos niveles. Adicionalmente, Gollnick y cols. (16) observaron que un incremento continuado en el consumo de glucosa de las piernas se relacionó con la cantidad de fibras musculares con bajo nivel en glucógeno muscular. Estos hallazgos sugieren que parece haber un desplazamiento en la fuente de energía a partir de los carbohidratos, del glucógeno muscular hacia la glucosa de la sangre, en circunstancias de realizarse actividades de ejercicio de duración incrementada, y que la glucosa de la sangre tiene la potencialidad de contribuir significativamente al metabolismo energético, siempre que la concentración de la glucosa de la sangre sea mantenida. Estos estudios de consumo de glucosa de las piernas no emplearon una intensidad o duración de ejercicio suficientes para causar fatiga, y por eso no se estableció una asociación entre la concentración de glucosa de la sangre, la oxidación y la resistencia.

ALIMENTACIÓN CON CARBOHIDRATOS Y RENDIMIENTO EN RESISTENCIA: PERSPECTIVAS RECIENTES

De acuerdo a lo discutido anteriormente, durante la pasada década se volvió repetidamente aparente, que la alimentación con carbohidratos durante el ejercicio, tiene el potencial de retrasar la fatiga. Es nuestra interpretación que la alimentación con carbohidratos mantiene la concentración de glucosa de la sangre y su oxidación, y por ello se convierte en la mayor fuente de energía de carbohidratos durante los últimos momentos del ejercicio prolongado, cuando la concentración de glucógeno muscular es baja. Por eso, un propósito de este artículo es el de identificar las condiciones del ejercicio que resultan en la fatiga, debido a una inadecuada disponibilidad de la glucosa de la sangre como combustible. Un propósito adicional, es el de discutir los mecanismos posibles por los cuales la alimentación con carbohidratos retrasa la fatiga.

EVIDENCIA DE QUE LA ALIMENTACIÓN CON CARBOHIDRATOS RETRASA LA FATIGA

Durante los años '70, generalmente también se creía que la ingestión de glucosa en humanos hacía una pequeña contribución a la energía total utilizada durante el ejercicio prolongado (17). Aunque se reconoció que el consumo de glucosa muscular podía incrementarse a altos niveles, especialmente con la ingestión de carbohidratos (15), en 1982 Felig y cols. (18) concluyeron que la alimentación con glucosa no retrasa la fatiga durante esfuerzos en el cicloergómetro al 60-65 % del VO_2 máx. Sin embargo, los sujetos de este estudio no eran experimentados ciclistas, y hubo entonces, una gran cantidad de variabilidad en la respuesta debido ala motivación y el aprendizaje. Esto se manifestó en que 13 de los 19 sujetos incrementaron su resistencia durante el segundo test, cuando se les proveyó un incentivo monetario. De todos modos, en cada una de las comparaciones, los tiempos de ejercicio fueron más largos ante el suministro de glucosa; los incrementos promedio en la duración del ejercicio fueron de 7 a 13 min. A raíz de la tremenda variabilidad en la respuesta, no es sorprendente que estas diferencias no fueran estadísticamente significativas.

Un indicador de que la ingestión de carbohidratos puede mejorarla performance de resistencia en sujetos, fue provista por Ivy y cols.(19). La ingestión de carbohidratos no incrementó la producción total de un trabajo de 2 hs comparado con un

grupo control, y por eso la performance no fue mejorada significativamente. De todos modos, durante los últimos 30 min de ejercicio, los sujetos fueron capaces de mantener o aun incrementar su tasa de trabajo inicial cuando se alimentaron con carbohidratos; en cambio, ellos comenzaban a fatigarse durante este período cuando consumieron solamente agua. Estas observaciones sugieren que los alimentos con carbohidratos comienzan a ejercer una influencia benéfica sobre la resistencia, luego de alrededor de 2 hs de ejercicio, e impulsaron a Coyle y cols. (20) a estudiar sujetos por períodos más largos.

Coyle y cols. (20) solicitaron a un grupo de ciclistas experimentados que hicieran esfuerzos al 74 % de su VO_2 máx. tanto como les fuera posible, en dos ocasiones. Cuando ellos no fueron capaces de mantener este ritmo de trabajo, se les permitió reducir el ritmo, a la más alta intensidad que ellos fueran capaces de mantener, al menos por otro período de 10 min. La fatiga se definió como el tiempo al cual la tasa de trabajo declinó en un 10 % en el VO_2máx. por debajo de la intensidad inicial (74 %). Todas la pruebas se realizaron después de una noche de ayuno. Durante una de las prueba bebieron una solución placebo (agua con sabor y color), mientras que durante la prueba con carbohidratos ingirieron ~70 g de maltodextrina en una solución de 500 g/l, después de 20 min de ejercicio, y 18 g adicionales de maltodextrina en una solución de 60 g/l, después de 60, 90 y 120 min. En el total del grupo de 10 sujetos, la fatiga fue significativamente retrasada en 23 min (por ej. 134±6 a 157±5 min; $p<0.01$) cuando se los alimentó con carbohidratos. Adicionalmente, un 6.6 % más de trabajo se completó después de 150 min de ejercicio. Sin embargo, la fatiga fue retrasada (por ej. 33 min; de 126±6 a 159±6 min) solo en 7 sujetos que experimentaron una declinación en los niveles de la glucosa en sangre a <3 mmol/L durante la prueba con placebo (Figura l). La fatiga durante la prueba con placebo fue asociada con síntomas del sistema nervioso central ante la hipoglicemia en solo dos de estos sujetos, mientras que los restantes se quejaron principalmente de un severo cansancio en los músculos en ejercicio, como causa de la fatiga. La fatiga no se retrasó en los tres sujetos en quienes la concentración de glucosa de la sangre no declinó durante la prueba con placebo, como lo muestra la Figura 1. Este estudio demostró que la alimentación con carbohidratos retrasa la fatiga y mejora la resistencia en sujetos, al prevenir la declinación de glucosa de la sangre a niveles que, en la mayoría de los sujetos, causan fatiga muscular local durante los últimos momentos del ejercicio prolongado.

LA ALIMENTACIÓN CON CARBOHIDRATOS NO AFECTA EL USO DEL GLUCÓGENO MUSCULAR DURANTE EL EJERCICIO EXHAUSTIVO CONTINUO

En un estudio subsiguiente, nosotros medimos el patrón de declinación en la concentración de glucosa de la sangre, en el vasto lateral, durante el ejercicio hasta la fatiga, al 74 % del VO_2máx. en dos ocasiones, con y sin alimentación con carbohidratos (21). La fatiga ocurrió después de 3.0±0.2 h, cuando se alimentó con placebo, mientras que la fatiga fue retrasada hasta 4.0±0.3 h cuando se alimentó con carbohidratos (por ej. ~70 g de maltodextrina en una solución de 500 g/L a los 20 min, seguidos por 28 g de maltodextrina en una solución de 100 g/L de allí en más, cada 20 min). Como se muestra en la Figura 2C, el patrón de declinación en la concentración del glucógeno muscular fue similar durante las primeras tres horas de ejercicio, con y sin la alimentación de carbohidratos. Remarcablemente, la hora adicional de ejercicio factibilizada por la alimentación con carbohidratos, ocurrió sin una ulterior declinación en la concentración del glucógeno muscular.

La siguiente interpretación de estas observaciones forma la base de nuestro modelo, con respecto al mecanismo por el cual la alimentación con carbohidratos mejora la performance durante el ejercicio intenso prolongado. Durante las primeras 2 hs de ejercicio, la tasa de oxidación de carbohidratos fue similar durante ambas pruebas (Figura 2B). De todos modos, la oxidación de carbohidratos comienza a declinar durante la tercer hora de la prueba al tomar placebo, en el momento en el que el glucógeno muscular era bajo y la concentración de glucosa en el plasma declinó significativamente a <2.5 mmol/L en el punto de fatiga. Nosotros interpretamos estas observaciones para indicar que la baja en la glucosa de la sangre durante los últimos momentos del ejercicio exhaustivo prolongado (Figura 2A) juega un rol importante en el desarrollo de la fatiga muscular, al no permitir que el consumo de glucosa de las piernas incremente suficientemente como para compensar la disponibilidad reducida de glucógeno muscular. Bajo estas condiciones, la fatiga es claramente precedida de una declinación en la oxidación de carbohidratos, la cual es, a su vez, precedida de una declinación en la glucosa del plasma a ~2.5 - 3.0 mmol/L.

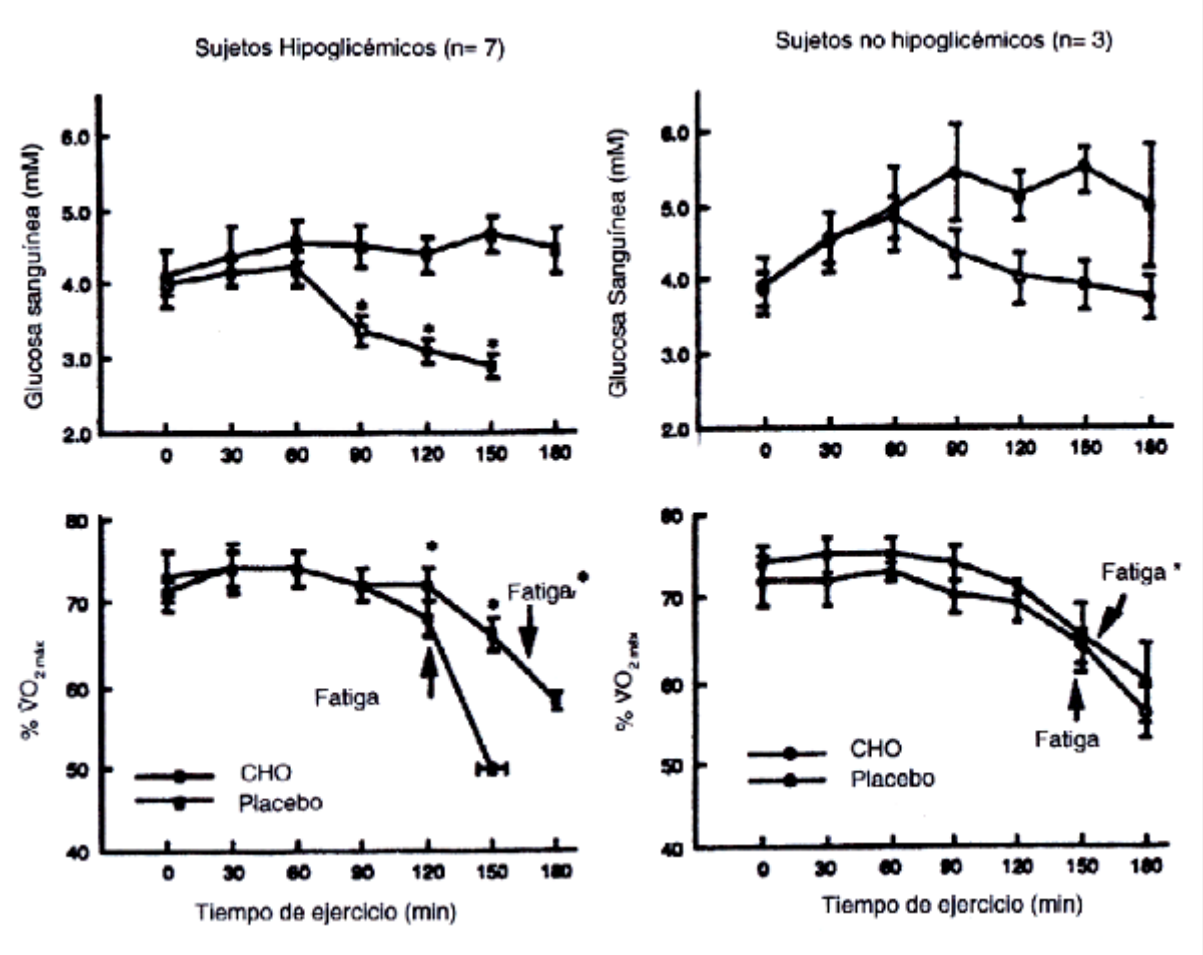


Figura 1. *Tasas de respuestas al trabajo durante el ejercicio hasta la fatiga, en sujetos que desarrollaron hipoglicemia, comparados con aquéllos que no la desarrollaron. (*) Denota una diferencia significativa con respecto a la otra prueba, al mismo tiempo; p<0.05.*

Cuando la glucosa del plasma se mantiene a 4-5 mmol/L, a través de la ingestión de carbohidratos, la alta tasa de oxidación de carbohidratos requerida por el ejercicio al 70 % del VO_2máx., fue mantenida constante y los sujetos fueron capaces de ejercitar enérgicamente por una hora más (por ej., 3-4 h) que cuando ayunaron (Figura 2A, B). Como ya se mencionó, la concentración de glucógeno muscular ya era baja después de la tercera hora, y esto, poco contribuyó al mantenimiento de la oxidación de los carbohidratos y a la tolerancia al ejercicio. En cambio, parece que otras fuentes de carbohidratos, presumiblemente la glucosa de la sangre, puede ampliamente reemplazar al glucógeno muscular al proveer carbohidratos para su oxidación durante los últimos momentos del ejercicio prolongado exhaustivo.

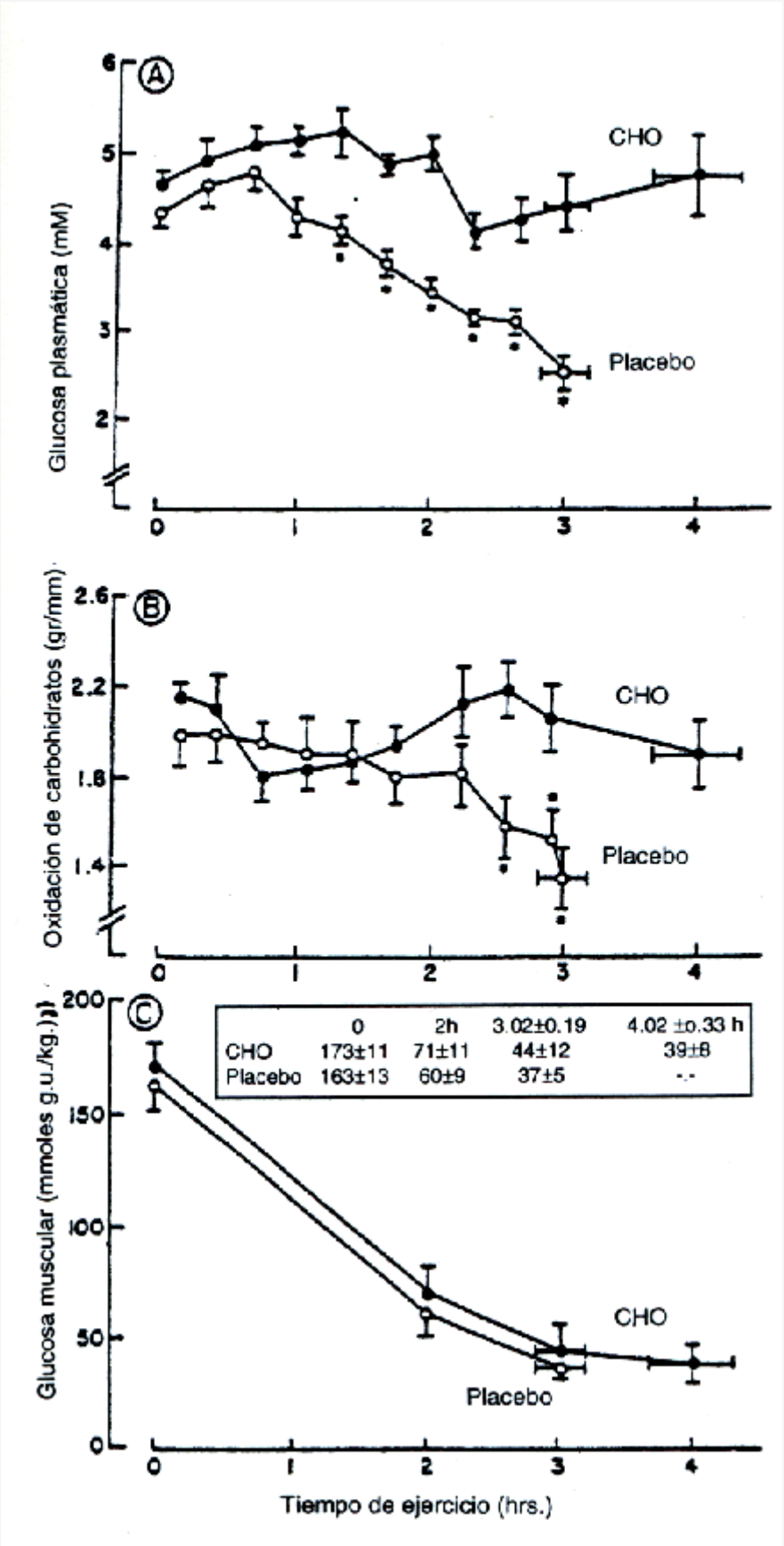


Figura 2. *Respuestas cuando pedalearon al 74 % del VO_2máx. con ingestión de placebo o de carbohidratos (CHO), cada 20 min. (*) Situación placebo es significativamente diferente de la situación carbohidratos; p< 0.05. (reproducido con permiso de la ref. 21).*

Estos conceptos se resumen en la Figura 3, en la cual se deja de lado el % de energía derivado de la oxidación de las

grasas y de los carbohidratos, que son calculados a través de R. La energía derivada del glucógeno muscular también fue calculada sobre la presunción de que 10 kg de músculo estuvieron activos, y usando glucógeno a una tasa promedio reflejada por la declinación del glucógeno en los vastos laterales. La diferencia entre la tasa del total de oxidación de carbohidratos y la utilización del glucógeno muscular, presumiblemente refleje la tasa de oxidación de la glucosa de la sangre.

Durante las dos primeras horas de ejercicio, las fuentes de energía son similares con o sin la ingestión de carbohidratos; sin embargo debería tenerse en cuenta que la glucosa ingerida, probablemente, reemplace el glucógeno del hígado como la fuente de oxidación de la glucosa de la sangre. La disponibilidad de carbohidratos parece limitarse durante la tercer horade la prueba con placebo, a raíz de una declinación en la concentración de la glucosa de la sangre en un momento en el cual el glucógeno muscular es bajo. Esto es prevenido por la oxidación de la glucosa de la sangre, la que se incrementa suficientemente como para compensar la reducida contribución del glucógeno muscular. Como resultado, la fatiga muscular ocurre después de 3 horas. La alimentación con CHO que mantiene la glucosa de la sangre entre 4-5 mmol/L durante los últimos momentos del ejercicio exhaustivo, parece permitir un incremento progresivo en la oxidación de glucosa de la sangre, al punto donde este parece proveer toda la energía a partir de los carbohidratos.

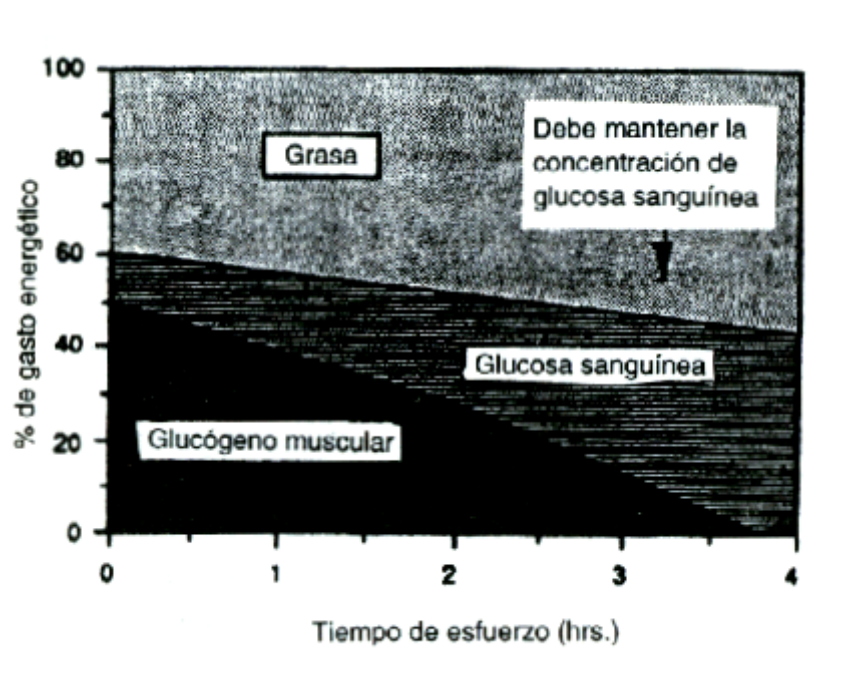


Figura 3. *Varias fuentes de energía durante el ejercicio prolongado al 70 % del VO_2máx. Nótese que la glucosa de la sangre se convierte en una fuente predominante de energía de carbohidratos durante los últimos momentos del ejercicio, y por ello es importante mantener la concentración de glucosa sanguínea mediante la ingesta de carbohidratos.*

¿QUE ES LO QUE CAUSA LA FATIGA DURANTE EL EJERCICIO, EN PRESENCIA DE ALIMENTACIÓN CON CARBOHIDRATOS?

Esta es una pregunta interesante con respecto a la causa de la fatiga, durante el ejercicio con alimentación con carbohidratos. No hubo señales de que la tasa de oxidación de carbohidratos fuese declinando antes de la fatiga, mientras los sujetos estaban recibiendo suplementación de carbohidratos, aunque ésta fuera baja (Figura 2 B). Por ello, podría esperarse que los sujetos deberían ser capaces de continuar por aun más de 4 hs (Figura 2, 3). También se podría interpretar que estas observaciones sugieren que la fatiga bajo estas condiciones es causada por otros factores que la depleción «per se» de los carbohidratos. Si la disponibilidad de carbohidratos no fuera así limitada, podrían emerger otras causas subsecuentes de fatiga. Existen muchas posibilidades, incluyendo los disturbios metabólicos musculares y las alteraciones neurológicas. La Figura 3 también apunta a la posibilidad de que la fatiga durante el ejercicio con la ingesta

con carbohidratos, ocurre generalmente cuando la contribución del glucógeno muscular para la producción de energía se vuelve cero, aunque su contribución relativa es pequeña durante la hora anterior a la fatiga. El punto es que este modelo experimental puede ayudar en el diseño de futuros estudios de las causas de la fatiga durante el ejercicio prolongado e intenso.

SUPLEMENTACIÓN CON CARBOHIDRATOS DURANTE LA FATIGA

Para probar más directamente la hipótesis de que la ingesta de carbohidratos mejora la performance del ejercicio al prevenir la declinación de la concentración de glucosa de la sangre y la oxidación en los últimos momentos del ejercicio, nosotros razonamos, que debería ser posible revertir la declinación en la oxidación de los carbohidratos, tanto como la fatiga durante el ejercicio cuando se estuvo en ayunas, restaurando la euglicemia (22). Por eso, fue realizado el estudio descrito en la Figura 4 . En tres ocasiones separadas, primero los sujetos ejercitaron al 70 % del VO_2máx. hasta el punto de fatiga, luego de una noche de ayuno (primer carga de ejercicio, Figura 4), desarrollando una declinación en la concentración de la glucosa del plasma (por ej., a 3.1 mmol/L) y R (por ej., a 0.81), antes de la fatiga. Después de 20 min de descanso, a los sujetos se los alentó a realizar más ejercicio (por ej., segunda carga de ejercicio, Figura 4) con tres tratamientos diferentes. En una prueba, ellos recibieron una solución placebo para beber durante el descanso. Cuando ellos intentaron realizar más ejercicio, la glucosa del plasma y el R no se mantuvieron sobre los niveles observados, durante la fatiga, en los ejercicios de la experiencia 1, y por ello los sujetos toleraron solamente 10±1 min de ejercicio. Durante otra prueba, se inyectó glucosa endovenosa (vía una bomba), al comienzo de la segunda prueba de ejercicio, a la tasa requerida para mantener la concentración de glucosa del plasma a 5 mmol/L. El mantenimiento de la euglicemia bajo estas condiciones subió, y mantuvo el R arriba de los niveles observados en la primer prueba, durante la fatiga (por ej., 0.83 vs 0.81), aunque el R se mantuvo aún más bajo que lo observado al comienzo de la prueba 1, cuando el glucógeno muscular era alto. El mantenimiento de la euglicemia les permitió a los sujetos completar unos 43±5 min adicionales de ejercicio (Figura 4). También se observó que el glucógeno muscular usado fue mínimo durante este ejercicio adicional, sugiriendo que la glucosa sanguínea fue la principal fuente de energía para la oxidación de los carbohidratos, la cual ocurrió a una tasa de 1.6 g/min. Un importante hallazgo de este estudio fue referente a que una tasa de infusión de glucosa mayor a 1.1 g/min se requirió para mantener la euglicemia, sugiriendo que esta glucosa exógena comenzó a oxidarse a una alta tasa bajo estas condiciones (por ej., bajo glucógeno muscular, hipoinsulinémico). A raíz de que el glucógeno muscular contribuyó poco a la generación de energía, es probable que la producción de glucosa endógena suplementó a la difusión de glucosa exógena proveyendo los carbohidratos necesarios para esta intensidad de ejercicio.

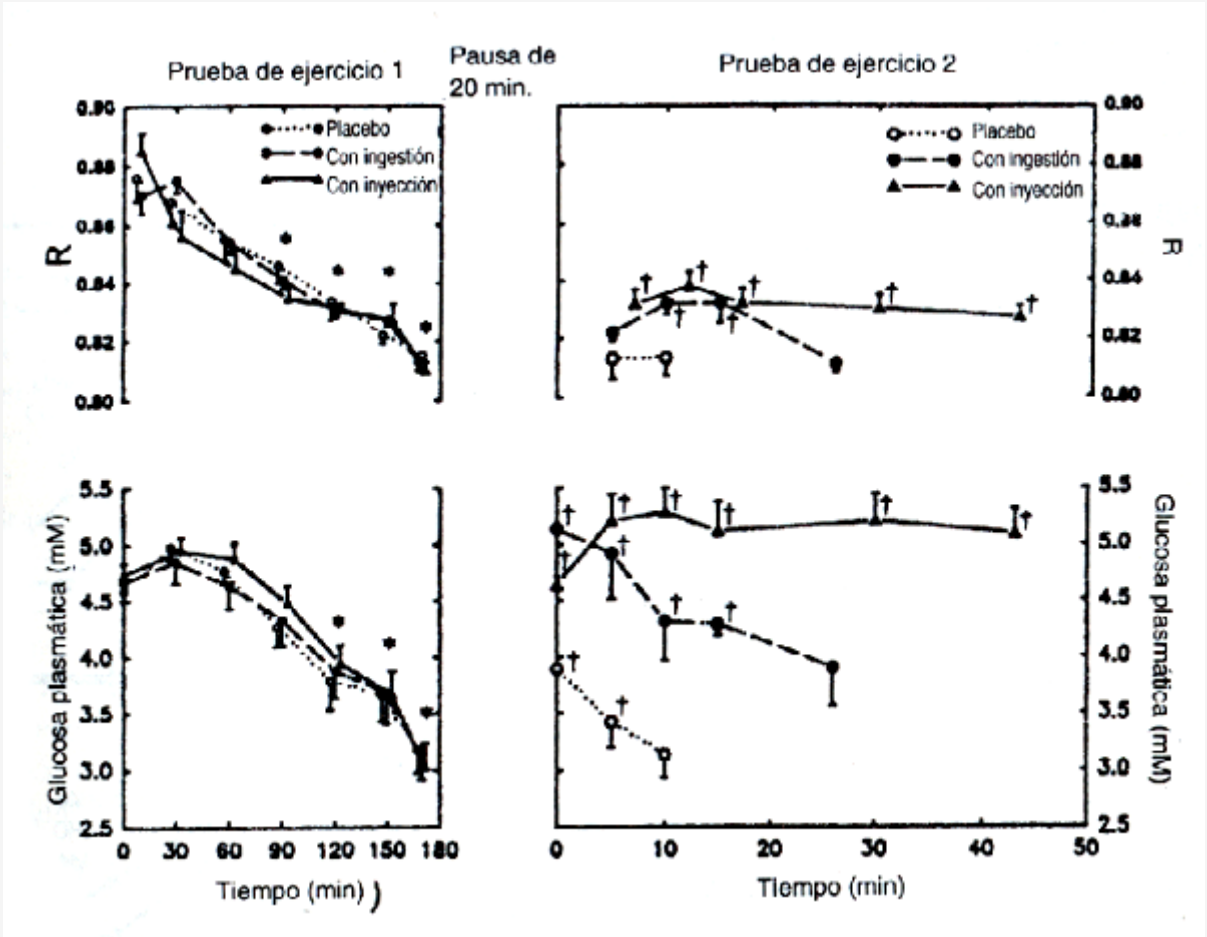


Figura 4. *Durante la prueba de ejercicio 1, los sujetos realizaron ciclismo al 74 % VO_2máx., hasta la fatiga. Después de 20 min de descanso, ellos continuaron ejercitando (prueba 2) con tres tratamientos diferentes: a) placebo (después de haber bebido agua sabor-simil y habérseles inyectado solución salina); b) ingetión de 200 g de una solución de 500 g/L de maltodextrina; y c) la inyección endovenosa de una solución de glucosa a una tasa que les mantenía la glucosa del plasma en 5 mmol/L. (+) Denota una significativa declinación durante la prueba de Ejercicio 1, p< 0.05 () Denota que los valores durante la prueba de Ejercicio 2, fueron significativamente más elevados que al final de la prueba de Ejercicio 1; p< 0.05 (reproducido con permiso de la ref. 22)*

Durante una tercera prueba, se ingirieron 200 g de una solución de 500 g/L de maltodextrina durante el período de descanso. Como resultado, durante la prueba de ejercicio 2, la concentración de glucosa en plasma y el R se incrementaron inicialmente por sobre los niveles de la fatiga de la prueba 1, pero no se los pudo mantener, declinando progresivamente al punto de la fatiga, la cual ocurrió después de 26±4 min. Esto sugiere que los carbohidratos ingeridos no fueron capaces de abandonar el estómago y ser absorbidos a través de los intestinos, hacia el torrente sanguíneo, lo suficientemente rápido como para igualar la tasa de velocidad a la cual la glucosa comenzó a ser removida de la circulación. Por ello, en general, parece que los sujetos no deberían esperar a sentirse fatigados, para comenzar a consumir carbohidratos. De todos modos, los individuos se diferencian ampliamente en el grado al cual la glucosa ingerida fue capaz de mantener la concentración de glucosa de la sangre y prolongar la performance.

INGESTA ANTES DE LA FATIGA

Nosotros pensamos que es importante, desde un punto de vista práctico, determinar cuánto antes del punto de fatiga, un ciclista debería ingerir CHO para restaurar y mantener la glucosa sanguínea a través de todo el ejercicio, mientras se mejora la capacidad en la performance (23). Los ciclistas ingirieron ~200 g de carbohidratos (por ej., 3 g/kg del peso corporal en una solución de 500 g/L de maltodextrina), después de 135 min de ejercicio, lo cual estaba en promedio ~35 min antes del punto de fatiga, cuando se ingería una solución placebo. La Figura 5 compara estas respuestas al ejercicio con un placebo. La fatiga ocurrió a los 170±10 min durante el placebo; cuando se ingirieron CHO, ocurrió un retraso de

unos 35 min (205±14 min; p< 0.05). Como se muestra en la Figura 5, la ingesta de carbohidratos después de 135 min revirtió la declinación en la glucosa del plasma y exitosamente restauró y mantuvo la euglicemia a lo largo del ejercicio restante. La declinación del R también fue detenida.

Estos hallazgos indican que la fatiga puede ser efectivamente retrasada en unos 35 min. en los ciclistas, cuando la ingesta de carbohidratos no es comenzada hasta 35 min antes del momento en que la fatiga podría ocurrir sin ingesta. Este retraso de la fatiga cuando se ingiere CHO antes que ella aparezca, fue de magnitud similar a los 43 min de ejercicio ulterior, que fue facilitado por la infusión endovenosa de la glucosa.

COORDINACIÓN TEMPORAL DE LA INGESTA CON CARBOHIDRATOS DURANTE EL EJERCICIO

Nosotros hemos demostrado que la fatiga puede ser retrasada de 30-60 min cuando los CHO son ingeridos a lo largo del ejercicio (20, 21), y cuando la ingestión comienza 35 min antes del punto de fatiga, de la situación de en que se había ayunado (23). Por ello, nosotros no tenemos una razón para recomendar cual esquema alimenticio es superior. El aspecto importante es que los carbohidratos ingeridos sean capaces de suplementar los depósitos de glucosa sanguínea a una tasa >1 g/min en los últimos momentos del ejercicio (22).

RESÍNTESIS DEL GLUCÓGENO MUSCULAR DURANTE EL EJERCICIO

Estas recomendaciones pertenecen al ejercicio continuo al 70 % del VO_2máx.; la declinación neta en la concentración del glucógeno muscular durante el ejercicio, cuando se ingieren carbohidratos, se determinará por el balance entre la glucogenólisis y la resíntesis del glucógeno. No parece ser que la alimentación con CHO altere la tasa neta de declinación en la concentración de glucógeno muscular durante el ejercicio prolongado mantenido a una alta intensidad (21). De todos modos, en ratas y en hombres se ha demostrado que los alimentos con carbohidratos proporcionados durante ejercicios a baja intensidad, los cuales eran ejecutados luego de ejercicios de alta intensidad prolongados, puede promover la resíntesis del glucógeno dentro de las fibras musculares no activas con una baja concentración de glucógeno (24, 25). Por ello, es posible que los carbohidratos ingeridos durante el ejercicio prolongado que varíe de alta a baja intensidad, o que incluya períodos de descanso activos, pueda dar como resultado una menor reducción neta de la concentración del glucógeno muscular (26).

Presumiblemente esto se deba a la resíntesis del glucógeno en fibras que no están activas durante los esfuerzos de ejercicio a baja intensidad. Por ello, cuando hay un potencial para la resíntesis del glucógeno durante el ejercicio, podría parecer que la ingesta de carbohidratos a lo largo del ejercicio, es potencialmente más benéfica que la demora en la reposición de los CHO hasta los últimos momentos del ejercicio.

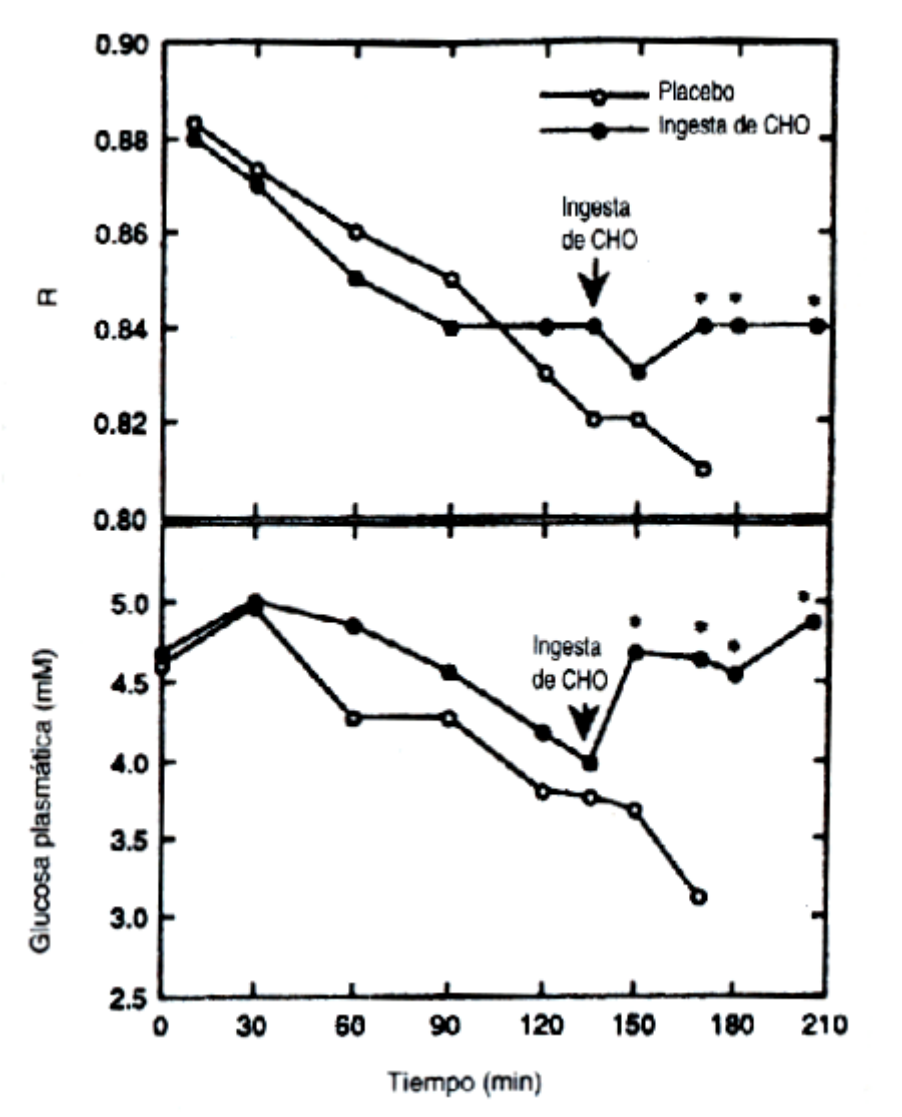


Figura 5. *Cociente respiratorio (R) y respuestas de la glucosa del plasma al ejercicio, cuando se ingiere solución placebo comparado con la ingesta de 200 g de maltodextrina, 35 min antes del punto estimado de fatiga. (*) ingesta de CHO significativamente más elevada que placebo (p<0.05) (reproducido con permiso de la ref. 23).*

LIMITACIONES DE LA INTENSIDAD DEL EJERCICIO

Al hacer nuestro el concepto el de que la glucosa sanguínea es la mayor fuente de carbohidratos durante los últimos momentos del ejercicio prolongado cuando se alimentó con carbohidratos, lo cual requiere una alta tasa de consumo de glucosa de la sangre por parte de los músculos, nosotros deseábamos saber si había un límite para la intensidad del ejercicio que pudiese ser mantenida.

Por ello, como se muestra en la Figura 6, nosotros determinamos la más alta intensidad en estado de equilibrio (steady-sate) que podría ser mantenida por ciclistas bien entrenados, luego de 2-3 hs de ejercicio (27). El ejercicio consistió en alternar esfuerzos de ciclismo de 15 min a intensidad moderada (ej., 60 % VO_2máx.) con alta intensidad (ej., inicialmente 80-85 % VO_2máx.), realizados hasta el agotamiento. Como se demuestra en la Figura 6, la tolerancia del trabajo de los sujetos fue idéntica durante las primeras dos horas de ejercicio. Interesantemente, durante el período de 105 a 120 min, los sujetos tuvieron que disminuir sus intensidades de ejercicio por debajo del 80 % VO_2máx. durante ambas pruebas, con ingesta de placebo y con ingesta de CHO. De todos modos, durante la prueba con placebo, la tasa de esfuerzo de los sujetos declinó progresivamente al 60 % VO_2máx., fatigándose después de 174 min. Cuando ellos ingirieron carbohidratos, sus niveles de fatiga se retrasaron significativamente hasta los 205 min ($p<0.05$). Además, cuando recibieron alimentación,

los sujetos fueron capaces de tolerar el ejercicio al 74-76 % VO_2máx. durante los períodos de la más alta intensidad. Es interesante especular que la incapacidad de los ciclistas para ejercitar más intensamente que a ~75 % VO_2 máx. se debe a una limitación en sus capacidades para transportar la glucosa de la sangre hacia el interior de las fibras musculares para su oxidación.

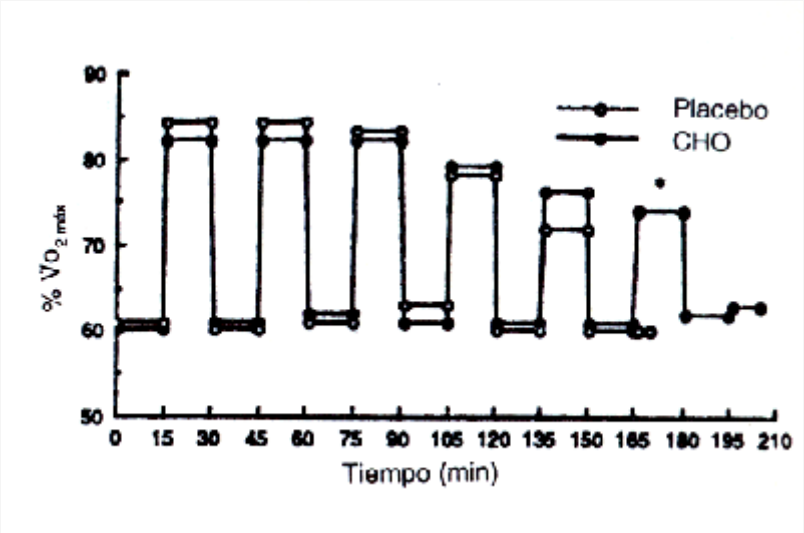


Figura 6. *Intensidad del ejercicio (en %VO_2 máx.) mantenida durante ejercicio con placebo comparado con ejercicios con ingesta de carbohidratos (CHO). Los valores son medias ± SE, para siete sujetos. (*) Denota que el % de VO_2máx ante la ingesta con carbohidratos es significativamente diferente al VO_2máx. con ingesta de placebo.*

CONCLUSIONES

La fatiga durante el ejercicio exhaustivo prolongado, comúnmente se debe a una inadecuada oxidación de los carbohidratos. Algunas veces, esto es el resultado de una hipoglicemia, la cual limita la oxidación de los carbohidratos y causa fatiga muscular. La ingesta con carbohidratos durante el ejercicio exhaustivo mantiene la oxidación de la glucosa de la sangre y retrasa la fatiga de 30 - 60 min, pero no previene la misma, la cual resulta eventualmente, a causa de factores todavía desconocidos. Durante los últimos estadios de ciclismo prolongado, cuando el glucógeno muscular es bajo, parece que la glucosa sanguínea puede proveer energía de los carbohidratos a suficientes tasas, necesarias como para hacer esfuerzos al ~75 % del VO_2máx., en ciclistas bien entrenados.

REFERENCIAS

1. Krogh, A. and Lindhard, J (1920). Relative value of fat and carbohydrate as a source of muscular energy. *Biochem. J. 14: 290-298*
2. Hultman, E (1967). Physiological role of muscle glycogen in man, with special reference to exercise. *Circ. Res. 20 (suppl. 1): 199-1112*
3. Hermansen, L., Hultman, E. and Saltin, B (1967). Muscle glycogen during prolonged severe exercise. *Acta Physiol. Scand. 71: 129-139*
4. Holloszy, J. O. and Coyle, E. F (1984). Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *J. Appl. Physiol. 56: 831-838*
5. Dill, D. B.., Edwards, H. T., and Talbott, J. H (1932). Studies in muscular activity. VII. Factors limiting the capacity for work. *J. Physiol. (Lond.) 77: 49-62*
6. Levine, S. A., Gordon, B. and Derick, C. L (1924). Some changes in the chemical constituents of the blood following a marathon race. *J. Am. Med. Assoc. 82: 1778-1779*
7. Gordon, B., Kohn, L. A., Levine, S. A., Matton, M., Scriver, W. de M. and Withing W. B (1925). Sugar content of the blood in runners following a marathon race. *J. Am. Med. Assoc. 85: 508-509*

8. Christensen, E. H. and Hansen, O (1939). II. Untersuchungen uber die Verbrennungsvorgange bei langdauernder, scwherer Muskelarbeit. Skand. *Arch. Physiol. 81: 152-161*
9. Christensen, E. H. and Hansen, 0 (1939). III. Arbeitfahigkeit und Ernahrung Skand. *Arch. Physiol. 81: 161-172*
10. Christensen, E. H. and Hansen, 0 (1939). IV. Hypoglykamie, Arbeitafahigkeit und Eraundung. Skand. *Arch. Physiol. 81: 172-179*
11. Bergstrom, J. and Hultman, E (1966). The effect of exercise on muscle glycogen and electrolytes in normals. *Scand. J. Clin. Invest. 18: 16-20*
12. Bergstrom, J., Hermansen, L., Hultman, E. and Saltin, B (1967). Diet, muscle glycogen, and physical performance. *Acta Physiol. Scand. 71: 140-150*
13. Wahren, J., Felig, P., Ahlborg, G. and Jorfeldt, L (1971). Glucose metabolism during leg exercise in man. *J. Clin. Invest. 50: 2715-2725*
14. Ahlborg, G., Felig, P., Hagenfeldt, L.L., Hendler, R. & Wahren, J (1974). Substrate turnover during prolonged exercise in man: Splanchnic and leg metabolism of glucose, free fatty acids, and amino acids. *J. Clin. Invest. 53: 1080-1090*
15. Ahlborg, G. and Felig, P (1976). Influence of glucose ingestion on fuel-hormone response during prolonged exercise. *J. Appl. Physiol. 41: 683-688*
16. Gollnick, P. D., Pernow, B., Essen, B., Jansson, E. and Saltin, B (1981). Availability of glycogen and plasma FFA for substrate utilization in leg muscle of man during exercise. *Clin. Physiol. 1:27-42*
17. Costill, D. L. and Miller, J. M (1980). Nutrition for endurance sport: Carbohydrate and fluid balance. *Int. J. Sports Med. 1: 2-14*
18. Felig, P., Cherif, A., Minagawa, A. and Wahren, J (1982). Hypoglycemia during prolonged exercise in normal men. New Engl. *J. Med. 306: 895-900*
19. Ivy, J. L., Costill, D. L., Fink, W. J. and Lower, R. W (1979). Influence of caffeine and carbohydrate feedings on endurance performance. *Med. Sci. Sports 11: 6-11*
20. Coyle, E. F., Hagberg, J. M., Hurley, B. F., Martin, W. H., Ehsani, A. A. and Holloszy, J. O (1983). Carbohydrate feedings during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *J. Appl. Physiol. 55: 230-235*
21. Coyle, E. F., Coggan, A. R., Hemmert, M. K. and Ivy, J. L (1986). Muscle glycogen utilization during prolonged strenuous exercise when fed carbohydrate. *J. Appl. Physiol. 61: 165-172*
22. Coggan, A. R. and Coyle, E. F (1987). Reversal of fatigue during prolonged exercise by carbohydrated infusion or ingestion. *J. Appl. Physiol. 63: 2388- 2395*
23. Coggan A. R. & Coyle, E. F (1989). Metabolism and performance following carbohydrate ingestion late in exercise. *Med. Sci. Sports Exercise 21: 59-65*
24. Constable, S. H., Young, J. C., Higuchi, J. and Holloszy, J. 0 (1984). Glycogen resynthesis in leg muscles of rats during exercise. *Am. J. Physiol. 247: R880-R883*
25. Kuipers, H., Keizer, H. A., Brouns, F., et. al (1987). Carbohydrate feeding and glycogen synthesis during exercise in man. *Pfluegers Arch. Eur. J. Physiol. 410: 652-656*
26. Brouns, F., Saris, W. H. M., Stoeken, J., et. al (1989). Eating, drinking, and cycling. A controlled Tourn de France simulation study, part II: Effect of diet manipulation. *Int. J. Sports Med. I0: S41-S48*
27. Coggan, A. R. & Coyle, E. F (1988). Effect of carbohydrate feedings during high-intensity exercise. *J. Appl. Physiol. 63:2388-2395*

Cita Original

Coyle, Eduard. Suplementación de Carbohidratos durante el Ejercicio. Revista de Actualización en Ciencias del Deporte Vol. 2 Nº 5. 1994.