



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Doble Grado en CCAFYD y Educación Primaria

Investigación aplicada sobre nutrición deportiva

**Efectos de la suplementación con zumo de remolacha y cacao
sobre la modulación del óxido nítrico y la función vascular en
atletas de resistencia**

Autor: Sofía Victoria Molinero Muñoz

Director: Diego Moreno Pérez

Curso académico: 2025/2026

Fecha: 14/04/2026

ÍNDICE

1. Justificación:	3
2. Marco teórico	4
3. Introducción	5
3.1. Contextualización histórica del entrenamiento de resistencia	5
3.1.1. Los orígenes del entrenamiento de resistencia en la Antigua Grecia	5
3.1.2. Relación entre fisiología del esfuerzo y rendimiento deportivo	5
3.1.3. Avances científicos y aparición de modelos de periodización moderna	6
3.2. Fundamentos del rendimiento en deportes de resistencia	7
3.2.1. Bases fisiológicas del rendimiento	7
3.2.2. Factores determinantes del rendimiento en deportes de resistencia cíclica	8
3.3. Ayudas ergogénicas en el deporte	10
3.3.1. Clasificación de las ayudas ergogénicas	11
3.3.2. La nutrición deportiva como pilar del rendimiento en deportes de resistencia: macronutrientes y micronutrientes	11
3.4. Suplementación con zumo de remolacha	13
3.5. Suplementación con cacao	15
3.5.1. Mecanismos de acción y compuestos bioactivos	15
3.5.2. Rendimiento en esfuerzos de resistencia	15
3.6. Posología	16
3.7. Comparación entre el cacao y el zumo de remolacha	17
4. Objetivos e hipótesis	18
5. Material y Método	20
5.1. Muestra	20
5.2. Diseño experimental	20
5.2.1. Procedimiento y mediciones	22
5.3. Análisis estadístico	24
5.3.1. Resultados esperados	24
6. Discusión	26
6.1. Novedades del estudio	30
6.2. Limitaciones del estudio	30
6.3. Futuras líneas de investigación	31
7. Conclusiones	32
8. Referencias	33

1. Justificación:

La elección de este trabajo surge, en primer lugar, de una motivación personal vinculada al interés por el ámbito de la nutrición deportiva, especialmente en lo relativo a la suplementación en deportistas. En concreto, existe un especial interés por el estudio de ayudas ergogénicas de origen natural, como el cacao o el zumo de remolacha, debido a su potencial para mejorar el rendimiento sin recurrir a suplementos artificiales. Este enfoque permite analizar cómo determinados alimentos presentes en la dieta habitual, pueden ser optimizados para favorecer el rendimiento en deportes de resistencia, lo que resulta especialmente atractivo tanto desde una perspectiva práctica como aplicada.

A nivel profesional, este trabajo se justifica por la creciente importancia de la nutrición como herramienta clave en el rendimiento deportivo. En el ámbito de las Ciencias de la actividad física y del deporte, el conocimiento de estrategias nutricionales basadas en evidencia científica resulta fundamental para el asesoramiento de deportistas, permitiendo diseñar intervenciones seguras, eficaces e individualizadas. En este sentido, en el estudio de compuestos bioquímicos como los flavonoides del cacao y los nitratos del zumo de remolacha contribuye a ampliar las competencias profesionales en el ámbito del rendimiento deportivo.

Desde el punto de vista científico, este trabajo se enmarca en una línea de investigación en la expansión, centrada en el papel de óxido nítrico y la función endotelial como mecanismos clave en el rendimiento de resistencia. A pesar del creciente número de estudios, aun así existe cierta controversia sobre la magnitud de los efectos de estas ayudas ergogénicas, especialmente en deportistas entrenados, lo que justifica la necesidad de seguir investigando en este campo.

2. Marco teórico

Las ayudas ergogénicas nutricionales son estrategias utilizadas para mejorar el rendimiento deportivo, especialmente en disciplinas de resistencia, donde la optimización del metabolismo energético y la eficiencia aeróbica resultan determinantes (*Maughan et al., 2018*). En los últimos años, ha aumentado el interés por aquellas de origen natural, como el cacao y el zumo de remolacha, debido a su contenido en compuestos bioactivos con potencial ergogénico.

Uno de los principales mecanismos de acción de estas ayudas se relaciona con el óxido nítrico (NO), una molécula clave en la regulación de la función endotelial y la vasodilatación. Un aumento en su biodisponibilidad mejora el flujo sanguíneo y la entrega de oxígeno al músculo, lo que puede favorecer el rendimiento en ejercicios de resistencia (*Jones et al., 2018*).

El zumo de remolacha, rico en nitratos inorgánicos, ha demostrado efectos positivos sobre la eficiencia del ejercicio y el rendimiento aeróbico a través de la vía nitrato–nitrito–NO (*Wylie et al., 2013*). Por otro lado, el cacao, derivado de *Theobroma cacao*, contiene flavonoides con propiedades antioxidantes y vasodilatadoras que también pueden aumentar la biodisponibilidad de NO (*Decroix et al., 2021*). Sin embargo, sus efectos sobre el rendimiento son menos consistentes, observándose principalmente beneficios en la reducción del estrés oxidativo más que en mejoras directas del rendimiento (*Davison et al., 2017*).

En conjunto, ambas estrategias nutricionales presentan potencial como ayudas ergogénicas en deportes de resistencia, aunque su eficacia puede variar en función de factores como el nivel de entrenamiento, la dosis y la duración de la suplementación.

3. Introducción

3.1. Contextualización histórica del entrenamiento de resistencia

3.1.1. Los orígenes del entrenamiento de resistencia en la Antigua Grecia

La evolución de los deportes de resistencia constituye un eje vertebral en la historia del entrenamiento deportivo. La disciplina del atletismo ha sido la principal impulsora de estos progresos, los cuales se han propagado a otros campos deportivos posteriormente. Se han desarrollado enfoques que han influido en sucesos notables en la preparación física, desde los principios establecidos en la Antigua Grecia, donde se introduce el aumento gradual de la carga, hasta la aparición de métodos actuales durante los siglos XIX y XX (*Esteve Lanao, s. f.; Esteve Lanao & Cejuela Anta, 2010*). La historia del entrenamiento de resistencia comienza precisamente en la Edad Antigua, en Grecia, donde la capacidad de sufrimiento era un valor social relacionado con la responsabilidad en el campo de batalla. Los entrenadores profesionales ya utilizaban un modelo de programación llamado “*tetra*”, un micro ciclo de 4 días que alternaba entrenamiento suave, muy intenso, descanso y una jornada de intensidad media (*Esteve & Casas, s. f.*).

3.1.2. Relación entre fisiología del esfuerzo y rendimiento deportivo

Cercano al siglo XIX, en Inglaterra, la carrera se consolidó como actividad preferida por la juventud y el elemento principal en el entrenamiento militar. Surgió el oficio de corredor-mensajero (running footmen), cuyas apuestas generaron a los primeros corredores profesionales. En Norteamérica, las competiciones de resistencia se centraron en el rendimiento en bandas horarias (como las pruebas de 6 horas).

Entrenadores como *Murphy, Cromwell y Robertson* introdujeron el trabajo fraccionado (o “series”) denominado como tempo-training, dividiendo la competición en distancias parciales corridas a la intensidad esperada (*Esteve Lanao & Cejuela Anta, 2010*).

3.1.3. Avances científicos y aparición de modelos de periodización

moderna

El atletismo se convirtió en el motor del desarrollo de la preparación física a principios del siglo XX. La escuela finlandesa dominó el fondo mundial con figuras clave como *Hans Kolehmainen* y *Paavo Nurmi*, quien revolucionó el entrenamiento al incorporar los trabajos de fuerza y velocidad, logrando así 7 victorias olímpicas y 22 récords mundiales. En Suecia, *Gösse Holmér* inventó el *fartlek*, un método de trabajo continuo con cambios de ritmo realizados en el medio natural. Paralelamente, la ciencia avanzó significativamente en 1927; *A.V.Hill* desarrolló la noción del VO_2 máximo, atrayendo un gran interés médico hacia el estudio de la resistencia (*Hill, 1927, citado en Clifford et al., 2021*).

Una nueva revolución metodológica ocurrió entre 1940 y 1942, cuando el alemán *Toni Nett* sugirió el uso de tramos intensos con recuperaciones muy breves, dando así origen al Interval-training. Este sistema fue popularizado por el checoslovaco *Emil Zatopek*, quien entrenó exclusivamente con intervalos, logrando manejar volúmenes de hasta 50 km diarios gracias a las pausas. Sin embargo, la euforia por el Interval-training decayó debido al sobreentrenamiento provocado por el exceso de intensidad y la mala aplicación del método.

A partir de los años 50, *Matveiev* desarrolló el primer modelo de periodización deportiva, consolidando una estructura científica del entrenamiento. En la actualidad, los avances en fisiología, biomecánica y tecnología han complejizado los sistemas de trabajo, y los ajustados calendarios de competición han impulsado nuevos modelos de periodización basados en cargas concentradas de cualidades específicas (*Esteve & Casas, s. f.*).

3.2. Fundamentos del rendimiento en deportes de resistencia

3.2.1. Bases fisiológicas del rendimiento

Los deportes de resistencia constituyen un grupo de disciplinas en los que el rendimiento depende principalmente de la capacidad del organismo para mantener un esfuerzo físico prolongado en el tiempo, en el que predomina el metabolismo aeróbico como fuente energética principal (*Esteve Lanao & Cejuela Anta, 2010*). En este tipo de actividades, el éxito deportivo se basa en la habilidad del atleta para sostener una determinada intensidad de ejercicio durante un período prolongado, optimizando el equilibrio entre la producción y el consumo de energía.

Entre las modalidades más representativas de este tipo de deporte se incluyen el atletismo de fondo y medio fondo, el ciclismo, la natación en aguas abiertas, el triatlón, el remo, el esquí de fondo y el montañismo. Todos ellos comparten características fisiológicas comunes: un elevado gasto energético, una alta demanda de oxígeno, un suficiente de los sustratos energéticos y una capacidad superior por resistir la fatiga (*Jones et al., 2016*).

El rendimiento en los deportes de resistencia no solo está determinado por la capacidad cardiovascular respiratoria, sino también por la eficiencia biomecánica y neuromuscular, la economía del movimiento, el estado nutricional y el control mental del esfuerzo (*Joyner & Coyle, 2008*). De hecho, el distrito competitivo en estas disciplinas depende de un delicado equilibrio entre factores fisiológicos psicológicos y ambientales, por ello el entrenamiento de resistencia ha sido históricamente 1 de los campos más estudiados de las ciencias del deporte (*Esteve Lanao, 2010*).

El término resistencia hace referencia a la capacidad del individuo para resistir la fatiga durante el ejercicio prolongado, manteniendo así una producción de potencia lo más constante posible (*Esteve Lanao & Cejuela Anta, 2010*). Esta capacidad implica procesos fisiológicos complejos, entre los que destacan la capacidad de transporte de oxígeno, la eficiencia

metabólica en la obtención de energía, en la capacidad amortiguadora frente a la acidosis y la recuperación post esfuerzo.

La resistencia, además, puede clasificarse en función de la duración del ejercicio:

- Resistencia de corta duración: esfuerzos entre 35 segundos y 2 minutos (por ejemplo, 800 metros lisos)
- Resistencia media: esfuerzos entre 2 y 10 minutos (1500m o 3000m)
- Resistencia larga: esfuerzos superiores a los 10 minutos, donde predomina el metabolismo aeróbico (carreras de fondo, maratón, triatlón, ciclismo, etc.

(Bompa & Buzzichelli, 2019)

Los deportes de resistencia se caracterizan también por su fuerte componente psicológico. La motivación, la tolerancia al dolor, la concentración y la percepción del esfuerzo son variables que inciden de forma directa sobre el rendimiento final *(Brick et al., 2016)*.

3.2.2. Factores determinantes del rendimiento en deportes de resistencia cíclica

El rendimiento de deportes de resistencia depende de la interacción entre los sistemas cardiovascular, respiratorio y muscular, cuya función conjunta es asegurar el aporte, transporte y utilización del oxígeno. Según el modelo clásico propuesto por *Bassett Howley (2000)*, tres factores determinan el rendimiento en resistencia: el consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx), el umbral de lactato y la economía de movimiento.

Estos factores no actúan de forma independiente, sino que se relacionan estrechamente y determinan la capacidad de un atleta para sostener una intensidad de ejercicio determinada durante un periodo prolongado.

- Consumo de oxígeno máximo (VO_2 max)

El VO_2 max es la cantidad máxima de oxígeno que el organismo puede captar, transportar y utilizar durante un esfuerzo máximo progresivo. Constituye uno de los principales indicadores del potencial aeróbico del deportista (*Hill, 1927, citado en Clifford et al., 2021*). En los atletas de élite de resistencia, este parámetro puede alcanzar valores superiores a 70-80 ml·kg·min en hombres y 60-70 ml·kg·min en mujeres (*Joyner & Coyle, 2008*).

El VO_2 max depende de múltiples factores fisiológicos:

- Capacidad pulmonar y eficiencia ventilatoria: se determinan la cantidad de oxígeno que llega a los alvéolos
- Volumen sistólico y gasto cardíaco, que condicionan el transporte de oxígeno a los tejidos.
- Concentración de hemoglobina, que afecta la capacidad de transporte del oxígeno en sangre.
- Densidad capilar y contenido mitocondrial, que determinan la utilización del oxígeno a nivel muscular.

El incremento del VO_2 máx se asocia con una mayor capacidad para sostener intensidades elevadas y retrasar la aparición de la fatiga. Sin embargo, como señalan *Bassett y Howley (2000)*, este parámetro tiene un límite genético y, una vez alcanzado un nivel elevado, las mejoras posteriores en el rendimiento suelen depender más de otros factores, como el umbral de lactato o la economía de carrera.

- Umbral de lactato

El umbral de lactato representa la intensidad de ejercicio a partir de la cual la producción de lactato en sangre supera su capacidad de eliminación, generando así una acumulación progresiva en el torrente circulatorio (*Coyle, 1995*). Este punto marca el límite entre un metabolismo predominantemente aeróbico y uno parcialmente anaeróbico.

Este, es un indicador más sensible del rendimiento que el VO_2 max, ya que

refleja la capacidad del deportista para mantener intensidades altas sin acumular fatiga metabólica. Los atletas de élite solían tener su umbral de lactato a intensidades cercanas al 85-90% de su VO_2 max, mientras que en individuos no entrenados este valor suele situarse en torno al 60% (*Holloszy & Coyle, 1984*).

El entrenamiento de resistencia desplaza el umbral hacia intensidades más altas debido a diversas adaptaciones: incremento de las enzimas oxidativas, mayor densidad mitocondrial, incremento del flujo capilar y mejora de la capacidad de las células para mantener estable el pH interno (*Coyle, 1995*). Estas adaptaciones permiten sostener mayores intensidades durante más tiempo sin acumular lactato, mejorando la tolerancia al esfuerzo.

- Economía de movimiento

La economía de movimiento o economía de carrera hace referencia al VO_2 necesario para mantener una velocidad submáxima determinada (*Saunders et al., 2004*). Cuanto menor sea el coste energético a una misma velocidad, mayor será la eficiencia del deportista.

Este parámetro depende de factores biomecánicos (la técnica de movimiento, la rigidez tendinosa y la longitud de zancada), neuromusculares (coordinación y patrón de reclutamiento de fibras) y fisiológicos (tipo de fibra y eficiencia muscular). *Moore (2016)* señala que los corredores más eficientes presentan una zancada elástica y económica, reduciendo el gasto energético total.

La economía de movimiento puede mejorarse mediante entrenamiento pliométrico, trabajo de fuerza específica, entrenamiento en altitud y desarrollo de la técnica de carrera (*Saunders et al., 2004*)

3.3. Ayudas ergogénicas en el deporte

A consecuencia de un avance en el conocimiento de la fisiología enfocada a la resistencia, la aparición de diferentes métodos de cuantificación de la carga, y de métodos de periodización científica, tenemos una visión más precisa y racional del entrenamiento (*Esteve Lanao, s. f.*). Por consiguiente,

el rendimiento deportivo empezó a entenderse como el resultado de la interacción entre diversos factores fisiológicos, biomecánicos, psicológicos y ambientales (*Esteve Lanao, s. f.*).

3.3.1. Clasificación de las ayudas ergogénicas

A partir de la comprensión multifactorial del rendimiento en los deportes de resistencia, se ha incrementado el interés por estrategias orientadas a optimizar las respuestas fisiológicas y el desempeño deportivo. Estas estrategias se clasifican tradicionalmente en ayudas mecánicas, farmacológicas, psicológicas y nutricionales, siendo estas últimas las más aceptadas en el ámbito deportivo por su perfil de seguridad, legalidad y respaldo científico. (*Decroix et al., 2021*).

Las ayudas nutricionales comprenden aquellas estratégicas dietéticas y suplementarias destinadas a mantener el equilibrio energético, optimizar la disponibilidad de sustratos y favorecer la recuperación tras el esfuerzo (adecuada ingesta de hidratos de carbono, proteínas y líquidos). Dentro de este grupo se encuentran intervenciones basadas en la adecuada ingesta de hidratos de carbono, proteínas y líquidos, así como el uso específico de suplementos con potencial efecto fisiológico.

En los últimos años, ha aumentado significativamente el interés por las ayudas nutricionales con mecanismos de acción más específicos. Entre las ayudas ergogénicas nutricionales más estudiadas destacan la cafeína, la creatina, la beta-alanina o el bicarbonato de sodio. Sin embargo, en los últimos años, la atención científica se ha desplazado hacia suplementos naturales con propiedades vasodilatadoras y antioxidantes, como el zumo de remolacha (rico en nitratos) y el cacao (rico en flavonoides) (*Domínguez et al., 2020; Clifford et al., 2021*).

3.3.2. La nutrición deportiva como pilar del rendimiento en deportes de resistencia: macronutrientes y micronutrientes

En este contexto, la nutrición deportiva se ha consolidado como un pilar esencial del rendimiento en los deportes de resistencia. Las

recomendaciones nutricionales para atletas de resistencia se estructuran en torno a tres pilares fundamentales.

En primer lugar, es imprescindible satisfacer las necesidades energéticas diarias para sostener el volumen y la intensidad del entrenamiento, así como para preservar la salud y la función fisiológica (*Thomas et al., 2016*).

En segundo lugar, se busca optimizar la disponibilidad y utilización de sustratos energéticos, especialmente hidratos de carbono y grasas, cuya contribución relativa depende de la intensidad y duración del ejercicio. A intensidades moderadas (40–60% del $\text{VO}_2\text{máx}$) predomina la oxidación lipídica, mientras que a intensidades elevadas ($\geq 75\%$ del $\text{VO}_2\text{máx}$) aumenta significativamente la dependencia de los carbohidratos como fuente energética principal (*Romijn et al., 1993*).

El glucógeno muscular constituye el combustible predominante durante los primeros 90–120 minutos de ejercicio intenso (*Bergström & Hultman, 1967*). Por ser un combustible limitado, su adecuada reposición entre sesiones resulta esencial para mantener la capacidad de trabajo y prevenir el síndrome de sobreentrenamiento energético (*Burke et al., 2018*).

Por su parte, la oxidación de grasas adquiere un papel especialmente relevante en esfuerzos prolongados, sobre todo en deportistas bien entrenados aeróbicamente, quienes presentan una mayor capacidad para movilizar y utilizar ácidos grasos tanto intramusculares como plasmáticos (*Spriet, 2014*). Este incremento en la capacidad de alternar entre fuentes energéticas, conocido como *metabolic flexibility*, constituye una de las principales adaptaciones inducidas por el entrenamiento de resistencia (*Hawley et al., 2014*).

Además de los macronutrientes, los micronutrientes desempeñan funciones esenciales en procesos enzimáticos, antioxidantes y de transporte de oxígeno, contribuyendo al mantenimiento del rendimiento y a la prevención de deficiencias nutricionales.

Dentro de este marco, algunas ayudas ergogénicas nutricionales presentes de forma natural en los alimentos contienen compuestos bioactivos con

potencial para mejorar la eficiencia fisiológica durante el ejercicio. Entre ellas destacan el cacao y el zumo de remolacha, ricos en flavanoles y nitratos respectivamente (*Davison et al., 2017; Jones et al., 2018*).

El Australian Institute of Sport (AIS, 2023) clasifica las ayudas ergogénicas en función del nivel de evidencia científica disponible:

- **Grupo A:** suplementos con evidencia sólida de eficacia (cafeína, creatina, bicarbonato, nitratos, hierro, carbohidratos, zumo de remolacha).
- **Grupo B:** suplementos en fase emergente de investigación y con posible aplicación contextual (cacao, cúrcuma, colágeno).
- **Grupo C:** suplementos sin evidencia convincente.
- **Grupo D:** sustancias prohibidas o con riesgo de dopaje.

En la actualidad, el interés científico se centra especialmente en compuestos naturales que actúan sobre la función endotelial y la biodisponibilidad del óxido nítrico, como los nitratos dietéticos y los flavanoles del cacao (*Clifford et al., 2021; Davison et al., 2022*). Ambos podrían representar estrategias prometedoras dentro de la nutrición aplicada a los deportes de resistencia.

No obstante, la eficacia de las ayudas ergogénicas depende de múltiples factores individuales y contextuales (estado de entrenamiento, dosis, momento de ingesta, interacción con la dieta habitual). Por ello, su utilización debe integrarse dentro de una planificación nutricional estructurada y basada en evidencia científica, con el objetivo de maximizar los beneficios y minimizar posibles efectos adversos.

3.4. Suplementación con zumo de remolacha

El zumo de remolacha constituye una de las ayudas ergogénicas nutricionales más estudiadas en el ámbito de los deportes de resistencia debido a su elevada concentración de nitratos inorgánicos (NO_3^-). Tras su

ingesta, estos nitratos se convierten primero en nitritos y después en óxido nítrico durante el ejercicio.

El óxido nítrico ayuda al organismo porque dilata los vasos sanguíneos, lo que mejora el flujo de sangre y de oxígeno a los músculos. Además, hace que el cuerpo necesite menos oxígeno para realizar el mismo esfuerzo y mejora el funcionamiento de las mitocondrias, que son las encargadas de producir energía en las células.

Gracias a estos efectos, el ejercicio puede percibirse como menos exigente y puede mejorar la eficiencia al correr o la economía de carrera (*Domínguez et al., 2020*). Estudios recientes han confirmado que la suplementación con nitratos puede aumentar la potencia aeróbica, prolongar el tiempo hasta el agotamiento y mejorar el rendimiento tanto en ejercicios de alta como de moderada intensidad, particularmente en atletas recreacionales (*Alsharif et al., 2023; Tan et al., 2023*). No obstante, en atletas muy entrenados, los resultados son menos contundentes, seguramente a una función endotelial optimizada consecuencia del entrenamiento acumulado durante años.

La mayoría de los protocolos experimentales y de aplicación práctica recomiendan la ingesta de 6–8 mmol de nitratos inorgánicos (equivalente a unos 500 mL de zumo concentrado de remolacha) aproximadamente 2,5–3 horas antes del ejercicio. Esta estrategia permite aprovechar la ventana de efecto agudo, que puede mantenerse entre 6 y 8 horas según la cinética individual y la intensidad del esfuerzo (*Tan et al., 2023*).

Durante este tiempo, los beneficios se asocian con una reducción del coste de oxígeno, una mayor eficiencia mitocondrial y un retardo en la aparición de la fatiga, especialmente en ejercicios de resistencia submáxima o prolongada (*Domínguez et al., 2020*).

Además del efecto agudo, se han estudiado protocolos de suplementación subcrónica (3- 7 días consecutivos), caracterizado por una mayor estabilidad en las concentraciones plasmáticas de nitrito, una mejora del rendimiento aeróbico y adaptaciones mitocondriales más duraderas (*Wylie et al., 2013; Tan et al., 2023*). Este protocolo se basa en la hipótesis de que la exposición repetida a los nitratos favorece la biogénesis mitocondrial y el aumento de

enzimas oxidativas, mejorando la eficiencia en la utilización del oxígeno. Sin embargo, la magnitud de estos efectos depende del nivel de entrenamiento, la dosis empleada y la variabilidad individual en la respuesta a los nitratos.

La evidencia por tanto concluye que la suplementación con zumo de remolacha puede mejorar la eficiencia cardiorrespiratoria y el rendimiento en esfuerzos de resistencia, principalmente a través de una mejora de la economía de carrera, si bien la respuesta parece estar modulada por el perfil del deportista.

3.5. Suplementación con cacao

3.5.1. Mecanismos de acción y compuestos bioactivos

El cacao, derivado del *Theobroma cacao*, destaca por su elevado contenido en fitoquímicos, específicamente flavanoles como la epicatequina y las procianidinas. Estos compuestos ejercen efectos antioxidantes, antiinflamatorios y, fundamentalmente, vasodilatadores (*Davison et al., 2017; Decroix et al., 2021*). A diferencia de los nitratos dietéticos, los flavonoles actúan activando de la enzima óxido nítrico sintasa endotelial (eNOS), mejorando la producción endógena de NO a partir de la L-arginina (*Davison et al., 2017; Decroix et al., 2021*). Además, los flavonoles tienen un efecto protector frente al estrés oxidativo, reduciendo la degradación del NO por especies reactivas de oxígeno (ROS), y mejorando la función endotelial (*Clifford et al., 2021*).

3.5.2. Rendimiento en esfuerzos de resistencia

La suplementación con cacao de manera aguda ha demostrado que la cinética del consumo de oxígeno ($\dot{V}O_2$ kinetics) en sujetos entrenados, facilita una transición más rápida hacia el estado estable. Esta mejora en la eficiencia del suministro de oxígeno es crucial en disciplinas de resistencia donde el esfuerzo submáximo es predominante.

Sin embargo, otros estudios no han hallado mejoras significativas en atletas altamente entrenados bajo protocolos agudos. (*Decroix et al. 2017*). En

concreto, no se observaron cambios en los niveles plasmáticos de nitratos/nitritos ni mejoras en el rendimiento aeróbico máximo de ciclistas. Esta falta de efecto se justifica debido a que los atletas de élite presentan una función endotelial altamente adaptada por el entrenamiento crónico, lo que reduce el margen de mejora o "techo terapéutico" de la suplementación aguda en comparación con sujetos recreacionales

En relación a la suplementación de cacao a nivel crónico (7 a 14 días), potencia la actividad de la (*eNOS:óxido nítrico sintasa endotelial*) y reduce de forma consistente los marcadores de estrés oxidativo (*García-Merino et al., 2020*). No obstante, existe una dicotomía en las adaptaciones: mientras que *García-Merino et al. (2022)* confirmaron la actividad biológica de los flavanoles al reducir el estrés oxidativo, también reportaron una inhibición parcial de la biogénesis mitocondrial. Este fenómeno sugiere que una carga antioxidante excesiva podría interferir con las señales *redox (especies reactivas de oxígeno)* necesarias para desencadenar las adaptaciones mitocondriales óptimas derivadas del entrenamiento de resistencia.

3.6. Posología

En cuanto a la posología, se distinguen dos estrategias principales según el objetivo temporal:

- **Protocolo Agudo:** Una dosis única de entre 200 y 400 mg de flavanoles permite alcanzar concentraciones máximas de epicatequina en plasma entre 1 y 2 horas post-ingesta. Los efectos en la vasodilatación mediada por flujo (FMD) son transitorios, con una duración de entre 3 y 5 horas (*Gröne et al., 2023*).
- **Protocolo Crónico/Subcrónico:** Una suplementación diaria durante 7-14 días con dosis de 400–500 mg de flavanoles (equivalentes a 25–40 g de cacao natural o 10–15 g de extracto concentrado) es necesaria para observar mejoras estables en la función endotelial y la recuperación (*Decroix et al., 2021*).

Dada la posible interferencia con la biogénesis mitocondrial, se recomienda

un uso estratégico y cíclico de la suplementación, priorizando periodos competitivos o de alta carga sobre las fases de base donde las adaptaciones celulares son prioritarias.

A continuación, se detalla de manera esquemática en una tabla las diferencias en posología entre el uso agudo vs crónico (*García-Merino et al., 2022*) (*Decroix et al., 2017*).

Tabla 3.6: Cambios en el protocolo de la suplementación observados

Franja temporal/ Protocolo	Dosis recomendada	Ventana temporal	Efectos principales	Observaciones en atletas de resistencia
Agudo	200–400 mg de flavanoles	Pico plasmático: 1–2 h Duración del efecto: 3–5 h	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento transitorio de la FMD (vasodilatación) • Mejora de la cinética del VO₂ 	Menor eficacia en atletas de élite debido a adaptaciones previas de la función endotelial.
Crónico / Subcrónico	400–500 mg de flavanoles (≈ 25–40 g de cacao)	Ingesta diaria durante 7–14 días	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora sostenida de la función endotelial (eNOS) • Reducción del estrés oxidativo 	Riesgo: una ingesta prolongada puede inhibir la biogénesis mitocondrial al neutralizar señales redox necesarias

3.7. Comparación entre el cacao y el zumo de remolacha

Tanto el zumo de remolacha como el cacao convergen en un mismo punto fisiológico: la modulación del óxido nítrico, molécula señalizadora clave en la perfusión muscular, eficiencia mitocondrial y la función vascular.

No obstante, sus mecanismos de acción difieren. Mientras que el zumo de remolacha actúa principalmente a través de la vía exógena nitrato–nitrito–NO, especialmente activa en condiciones de hipoxia, el cacao estimula la producción endógena de NO mediante la activación de la eNOS y la protección antioxidante del endotelio vascular.

Estas diferencias sugieren una posible complementariedad tanto en términos fisiológicos como temporales: los nitratos podrían generar un aumento relativamente rápido de la disponibilidad de NO en el contexto agudo precompetitivo, mientras que los flavanoles podrían contribuir a mejorar la función endotelial y el entorno redox a medio plazo.

A pesar de la evidencia individual de ambos compuestos, los estudios que analizan su efecto combinado en atletas de resistencia son escasos, lo que limita la comprensión de una posible interacción sinérgica. Esta laguna en la literatura justifica la necesidad de investigar estrategias que integren ambas vías de modulación del NO en el contexto del rendimiento aeróbico.

4. Objetivos e hipótesis

- Objetivo general: Analizar y comparar los efectos de la suplementación con cacao, con zumo de remolacha y de su combinación sobre variables del rendimiento aeróbico y el rendimiento en una prueba de 5 km en corredores entrenados de medio fondo.
- Hipótesis general: La suplementación con cacao y con zumo de remolacha produce cambios en variables del rendimiento aeróbico y en el rendimiento en una prueba de 5 km en corredores entrenados de mediofondo, siendo mayores los efectos observados tras la suplementación combinada en comparación con la suplementación aislada.

De este objetivo general, se describen unos objetivos específicos:

- Objetivo específico 1

Determinar el efecto de la suplementación con cacao, consumo de remolacha y de su combinación sobre la velocidad asociada a los umbrales fisiológicos durante la prueba incremental.

- Hipótesis específica 1

La suplementación con cacao, consumo de remolacha y su combinación no incrementan la velocidad asociada a los umbrales fisiológicos.

- Objetivo específico 2

Evaluar el efecto de la suplementación con cacao, con zumo de remolacha y de su combinación sobre el consumo máximo de oxígeno (VO_2 máx) en corredores entrenados de mediofondo.

- Hipótesis específica 2

La suplementación con cacao, con zumo de remolacha y su combinación no producen mejoras en el VO_2 máx en corredores entrenados de mediofondo

- Objetivo específico 3

Analizar los efectos de la suplementación con cacao, con zumo de remolacha y de su combinación sobre la economía de carrera durante una prueba incremental.

- Hipótesis específica 3

La suplementación con zumo de remolacha mejora La economía de carrera, observándose una mayor reducción del coste de oxígeno tras la suplementación combinada en comparación con la suplementación aislada.

- Objetivo específico 4

Comparar el efecto de la suplementación con cacao, con zumo de remolacha y de su combinación sobre el rendimiento en un test de campo de 5 km en corredores entrenados de mediofondo.

- Hipótesis específica 4

La suplementación con zumo de remolacha Mejora el rendimiento de una prueba de 5 km, observándose mayores mejoras tras la suplementación combinada respecto a la suplementación aislada.

5. Material y Método

5.1. Muestra

La muestra del presente estudio estará compuesta por 20 corredores varones entrenados especializados en pruebas de resistencia de mediodondo. Todos los participantes contarán con una amplia experiencia en entrenamiento aeróbico, con una trayectoria deportiva superior a los 10 años, lo que garantiza un alto nivel de adaptación fisiológica al esfuerzo de resistencia.

Los criterios de inclusión establecidos para participar en el estudio serán los siguientes: ser varón, tener una edad comprendida entre los 18 y los 45 años, estar familiarizado con el entrenamiento de carrera a pie de alta intensidad, presentar un consumo máximo de oxígeno ($VO_2\text{máx}$) superior a $60 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ y mantener una práctica regular y sistemática del entrenamiento de resistencia, no suplementación previa con nitratos o polifenoles.

Por otro lado, se considerarán criterios de exclusión: la presencia de cualquier lesión o patología que pueda afectar al rendimiento físico, el incumplimiento del programa de entrenamiento o de las pautas del estudio, así como la ingesta de suplementos nutricionales o ayudas ergogénicas que puedan influir en el rendimiento o la recuperación durante el periodo experimental.

5.2. Diseño experimental

Se llevará a cabo un diseño experimental cruzado, aleatorizado y controlado, en el que todos los participantes completarán cuatro condiciones de suplementación propuestas: cacao, zumo de remolacha y la combinación de cacao más zumo de remolacha. Cada intervención tendrá una duración de 7 días y estará separada por un periodo de lavado de una semana, con el objetivo de minimizar posibles efectos residuales entre condiciones (*Senns, 2002*).

Tabla 5.2.1: diseño experimental de suplementación

Periodo	Condición	Duración
0	Familiarización + basal	—
1	Placebo	7 días
2	Wash-out	7 días
3	ZR	7 días
4	Wash-out	7 días
5	C	7 días
6	Wash-out	7 días
7	ZR + C	7 días

ZR = zumo de remolacha; C = cacao; ZR+C = suplementación combinada (zumo de remolacha + cacao); wash-out = periodo de lavado sin suplementación destinada a minimizar efectos residuales; familiarización = sesión previa para adaptación a las pruebas; basal = medición inicial.

A = Placebo

B = ZR

C = Cacao

D = ZR+C

Tabla 5.2.2: Diseño experimental aleatorizado

Condición	Remolacha	Cacao
Placebo	Placebo	Placebo
ZR	Activo	Placebo
C	Placebo	Activo
ZR+C	Activo	Activo

ZR = zumo de remolacha; C = cacao; ZR+C = suplementación combinada de zumo de remolacha y cacao. Activo = suplementación con el compuesto correspondiente; Placebo = sustancia sin efecto ergogénico.

Tabla 5.2.3: Ejemplos de secuencias posibles

Condiciones	Secuencias posibles
1	A B C D
2	B C D A
3	C D A B
4	D A B C

A = placebo; B = zumo de remolacha; C = cacao; D = suplementación combinada.

El estudio se desarrollará en el laboratorio de fisiología de la Universidad Pontificia de Comillas (sede de Cantoblanco) durante el mes de septiembre de 2026. Las pruebas de campo se realizarán en la pista de atletismo del Polideportivo José Caballero, situado en Alcobendas.

La asignación del orden de las condiciones de suplementación se realizará de forma equilibrada para reducir posibles efectos del orden. De este modo, 5 participantes iniciarán el protocolo con la suplementación de cacao, otros 5 comenzarán con el zumo de remolacha, 5 más lo iniciarán con placebo y los 5 restantes iniciarán con la combinación de cacao y zumo de remolacha. Este procedimiento sigue la metodología empleada en estudios previos sobre suplementación con nitratos en deportistas de resistencia (*López-Samanes et al.*).

Cada participante realizará una valoración completa del rendimiento al finalizar cada fase de suplementación, completando así tres evaluaciones idénticas a lo largo del estudio.

5.2.1. Procedimiento y mediciones

Inicialmente, los participantes realizarán un calentamiento estandarizado que consistirá en correr durante 6 minutos alrededor del 80% de la frecuencia cardiaca máxima (~12 km/h). Usaremos este calentamiento, para medir la economía de carrera (*Barnes & Kilding, 2015; Morgan et al., 1989*).

- Prueba incremental de carrera a pie con analizador de gases

La capacidad aeróbica se evaluará mediante una prueba incremental de carrera a pie hasta la extenuación en tapiz rodante (Technogym, Codognè, Italia), utilizando un sistema de análisis de gases respiratorios portátil (Medical Graphics Corporation, VO2000, St. Paul, MN, EE. UU.). A partir de esta prueba se obtendrán las siguientes variables:

- Velocidad del Primer Umbral Ventilatorio (VT1)
- Velocidad del Segundo Umbral Ventilatorio (VT2)
- Velocidad Aeróbica Máxima (VAM)
- Consumo de Oxígeno Máximo ($\dot{V}O_2$ máx).

Se registrará la frecuencia cardiaca para establecer zonas de entrenamiento y controlar de forma objetiva la carga de entrenamiento con la metodología de ECOS (Escala de Carga Objetiva) Se controlará la carga de entrenamiento Para que sea igual para todos los participantes en cada fase del estudio.

El protocolo comenzará con una pendiente del 1% a una velocidad inicial de $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, con incrementos de $0,3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ cada 30 segundos hasta la máxima extenuación (*Jones & Doust, 1996; Moreno-Perez et al., 2020*).

De acuerdo con el modelo clásico de tres fases propuesto por Skinner y McLellan (1980), se establecerán tres zonas de entrenamiento:

1. Zona 1: $\leq VT1$
2. Zona 2: entre VT1 y VT2 (por encima de VT1 y por debajo de VT2)
3. Zona 3: $\geq VT2$ y $\leq \dot{V}O_2$ peak

Los participantes realizaron el entrenamiento siguiendo una distribución polarizada del tiempo de entrenamiento, aproximadamente 77% en Zona 1, ~5% en Zona 2 y 17–18% en Zona 3 (*Stephen Seiler & Kjerland, 2006; Esteve-Lanao et al., 2007*).

En cuanto a la distribución relativa de la carga total de entrenamiento, esta fue aproximadamente 43% en Zona 1, 7% en Zona 2 y 50% en Zona 3 para ambos grupos.

- Prueba de rendimiento específico en resistencia

Transcurridas 48 horas desde la primera sesión de evaluación, los participantes realizarán una prueba de carrera a pie de resistencia sobre 5 km en pista de atletismo. El tiempo total se registrará mediante cronómetro manual. Al finalizar la prueba, se evaluará la percepción subjetiva del esfuerzo (RPE) utilizando la escala de Borg de 6 a 20 (*Borg, G. (1998)*).

5.3. Análisis estadístico

Los datos se analizarán mediante los programas estadísticos SPSS y Jamovi. En primer lugar, se comprobará la normalidad de las variables mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Posteriormente, se aplicará un análisis de la varianza de medidas repetidas (ANOVA) para evaluar el efecto de las diferentes condiciones de suplementación sobre las variables de rendimiento. En caso de incumplimiento del supuesto de esfericidad, se aplicará la corrección de Greenhouse–Geisser. Cuando sea necesario, se realizarán comparaciones post-hoc con corrección de Bonferroni.

Asimismo, se analizarán posibles correlaciones entre los cambios observados en las variables fisiológicas y el rendimiento deportivo mediante coeficientes de correlación de Pearson o Spearman, según proceda. Se calcularán tamaños del efecto para valorar la magnitud de las diferencias observadas. El nivel de significación estadística se establecerá en $p < .05$

5.3.1. Resultados esperados

La previsión de resultados en nuestra futura intervención son los siguientes:

Variables de rendimiento por grupo y grado de significación

Variable	Grupo	PRE	POST	P	
Economía 12km/h (ml/kg/min)	C	200	198	$p > .05$	
	ZR	203	188	$p < .05^*$	
	C+ZR	197	190	$p < .05^*$	
	Placebo		194	195	$p > .05$
VT1 (km/h)	C	12	12,2	$p > .05$	
	ZR	12,1	12,1	$p > .05$	
	C+ZR	12,2	12,4	$p > .05$	
	Placebo		12,0	12,2	$p > .05$
VT2 (km/h)	C	17,2	17,1	$p > .05$	
	ZR	17,3	17,4	$p > .05$	
	C+ZR	17,2	17,3	$p > .05$	
	Placebo		17,1	17,1	$p > .05$
Velocidad Aeróbica Máxima (VAM) (km/h)	C	19,6	19,8	$p > .05$	
	ZR	20,1	20,3	$p > .05$	
	C+Z	19,8	20,3	$p > .05$	
	Placebo	19,7	19,8	$p > .05$	
$\dot{V}O_2$ max (km/h))	C	21	21,1	$p > .05$	
	ZR	21,1	21,3	$p > .05$	
	C+ZR	21	21,1	$p > .05$	
	Placebo		20,9	21	$p > .05$
$\dot{V}O_2$ max (ml/kg/min)	C	67,2	67,3	$p > .05$	
	ZR	67,0	67,1	$p > .05$	
	C+ZR	67,2	67,4	$p > .05$	
	Placebo		67,1	67,2	$p > .05$

Tiempo 5000ml (min:sg)	C	15:45	15:50	$p > .05$
	ZR	15:50	15:20	$p < .05^*$
	C+ZR	15:48	15:25	$p < .05^*$
	Placebo	15:48	15:25	$p > .05$
		15:42	15:38	
RPE (test 5000ml)	C	20	20	$p > .05$
	ZR	20	20	$p > .05$
	C+ZR	20	20	$p > .05$
	Placebo	20	20	$p > .05$
		20	20	

ZR = zumo de remolacha; C = cacao; ZR+C = suplementación combinada de zumo de remolacha y cacao. Placebo = sustancia sin efecto ergogénico.

- C → Cacao
- ZR → Zumo de Remolacha
- C+ZR → Cacao y Zumo remolacha
- Placebo

6. Discusión

El objetivo del presente estudio fue analizar los efectos de la suplementación con cacao, con zumo de remolacha y de su combinación sobre diferentes variables fisiológicas del rendimiento aeróbico y el rendimiento en una prueba de 5 km en corredores entrenados de medio fondo. Dado que se trata de resultados hipotéticos, la interpretación de estos debe realizarse con cautela y en relación con la evidencia científica existente.

Los resultados hipotéticos sugieren que en la suplementación con zumo de remolacha y la suplementación combinada (cacao + zumo de remolacha) no se observarían cambios significativos en variables fisiológicas máximas

como el VO_2 máx o las velocidades asociadas a los umbrales ventilatorios, pero sí podrían generar mejoras en la economía de carrera y en el rendimiento en una prueba de 5 km. Estos hallazgos potenciales son, en gran medida, coherentes con el conocimiento actual sobre el efecto de las ayudas ergogénicas basadas en la modulación del óxido nítrico en deportes de resistencia.

En relación con las variables fisiológicas obtenidas durante la prueba incremental (VT1, VT2, VAM al VO_2 máx), los resultados hipotéticos muestran la ausencia de cambios significativos en todas las condiciones de suplementación.

La ausencia de cambios en los umbrales ventilatorios también podría explicarse por el alto nivel de entrenamiento de los participantes incluidos en el estudio. Los corredores seleccionados presentan valores de VO_2 máx superiores a $60 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, lo que indica una elevada capacidad aeróbica. En este tipo de deportistas, las adaptaciones fisiológicas inducidas por el entrenamiento ya se encuentran próximas a su techo adaptativo, lo que reduce la probabilidad de observar mejoras adicionales mediante intervenciones nutricionales de corta duración.

El consumo máximo de oxígeno está fuertemente determinado por factores estructurales del sistema cardiovascular, como el gasto cardíaco máximo, el volumen sistólico o la capacidad de transporte de oxígeno en sangre (*Bassett & Howley, 2000; Joyner & Coyle, 2008*). Estas adaptaciones se desarrollan principalmente a través del entrenamiento crónico de resistencia y presentan un margen de mejora limitado en deportistas con un elevado nivel de entrenamiento.

De forma similar, los flavonoles del cacao parecen influir principalmente en la función endotelial y en la cinética del consumo de oxígeno durante el ejercicio submáximo, sin producir cambios significativos en el VO_2 máx (*Clifford et al., 2021*).

En el caso de la suplementación con nitratos, la mayoría de los estudios han demostrado que sus efectos ergogénicos no se deben a un aumento del VO_2 máx, sino a una mejora de la eficiencia metabólica y de la economía del

ejercicio (*Domínguez et al., 2020*).

En consecuencia, los resultados hipotéticos del presente estudio confirmarían la hipótesis específica 1 y la hipótesis específica 2 porque no habría cambios ni en los umbrales ni en el VO_2 máx respectivamente.

Respecto a la economía de carrera tras la suplementación con zumo de remolacha y tras la suplementación combinada con cacao y zumo de remolacha, los resultados hipotéticos del presente estudio muestran una mejora significativa mientras que no se observan cambios significativos tras la suplementación aislada con cacao.

Estos resultados serían consistentes con la evidencia científica existente acerca del efecto ergogénico de los nitratos dietéticos. La suplementación con zumo de remolacha ha demostrado reducir el coste de oxígeno durante el ejercicio submáximo, mejorando la eficiencia metabólica del organismo durante el ejercicio de resistencia (*Domínguez et al., 2020; Wylie et al., 2013*). Este efecto produce una mayor vasodilatación, mejora la perfusión muscular y optimiza la eficiencia mitocondrial.

Como consecuencia, el organismo requiere una menor cantidad de oxígeno para producir la misma cantidad de trabajo mecánico, lo que se traduce en una mejora de la economía de carrera, uno de los principales determinantes del rendimiento en deportes de resistencia (*Barnes & Kilding, 2015*).

Además, los resultados hipotéticos sugieren que la combinación de cacao y zumo de remolacha podría producir mejoras similares o incluso ligeramente superiores a las observadas con la suplementación aislada de nitratos. Este resultado podría explicarse por una posible interacción complementaria entre ambos compuestos. Mientras que los nitratos dietéticos aumentan la disponibilidad de óxido nítrico a través de una vía exógena, los flavonoles presentes en el cacao estimulan la producción endógena de NO mediante la activación de la enzima óxido nítrico sintasa endotelial (*Davison et al., 2017; Decroix et al., 2021*). Esta doble vía de producción de óxido nítrico podría favorecer una mejora en la función vascular y en la eficiencia del suministro de oxígeno a los músculos activos.

Por el contrario, no se observarían mejoras significativas tras la suplementación aislada con cacao. Este resultado coincide con diversos estudios realizados en atletas entrenados que han mostrado efectos limitados de los flavonoles sobre variables de rendimiento aeróbico. En este sentido, la literatura ha señalado que los efectos ergogénicos de algunos suplementos pueden ser más pronunciados en sujetos recreacionales que en atletas altamente entrenados, debido al menor margen de mejora fisiológica en estos últimos (*Jones et al., 2018*).

Por tanto, a partir de estos resultados hipotéticos, la hipótesis específica 3 se confirmaría (no parcialmente), ya que la economía de carrera mejora tras la suplementación con zumo de remolacha y con la combinación de suplementos, pero no tras la suplementación aislada con cacao.

En relación con el rendimiento en la prueba de campo de 5 km, los resultados hipotéticos muestran una mejora significativa en el tiempo total tras la suplementación con zumo de remolacha y con la suplementación combinada (cacao + ZR), mientras que no se observarían cambios significativos tras la suplementación aislada con cacao ni en la condición placebo.

Estos resultados potenciales serían coherentes con la literatura científica sobre suplementación con nitratos, donde se ha observado una mejora del rendimiento en pruebas de resistencia de duración corta y media, especialmente en esfuerzos comprendidos entre 5 y 30 minutos (*Domínguez et al., 2020; Alsharif et al., 2023*). La mejora del rendimiento se ha asociado principalmente con una reducción del coste energético del ejercicio, una mejora de la eficiencia muscular y una mayor tolerancia al esfuerzo submáximo prolongado.

La mejora observada en la condición combinada podría sugerir nuevamente un posible efecto sinérgico entre los nitratos y los flavonoles del cacao. La combinación de ambas intervenciones podría favorecer una mayor biodisponibilidad de óxido nítrico, mejorando la perfusión muscular y el suministro de oxígeno durante el ejercicio.

Sin embargo, la ausencia de mejoras tras la suplementación aislada con

cacao coincide con resultados previos en atletas entrenados, donde los efectos ergogénicos de los flavanoles sobre el rendimiento han sido inconsistentes (*Decroix et al., 2017; Davison et al., 2022*). Esto sugiere que el impacto del cacao podría depender de factores como el nivel de entrenamiento del deportista, la duración del protocolo de suplementación o la dosis administrada.

Por tanto, a partir de estos resultados hipotéticos, la hipótesis específica 4 se confirmaría, ya que se observarían mejoras en el rendimiento en la prueba de 5 km tras la suplementación con zumo de remolacha y con la combinación de suplementos, pero no tras la suplementación con cacao de forma aislada.

6.1. Novedades del estudio

El presente estudio podría aportar una contribución relevante a la literatura científica, ya que sería uno de los primeros trabajos en analizar el efecto combinado de la suplementación con cacao y zumo de remolacha en atletas de resistencia entrenados.

Aunque ambos suplementos han sido ampliamente estudiados de forma independiente, la literatura científica disponible sobre su efecto combinado es muy limitada. Por tanto, los resultados obtenidos podrían abrir nuevas perspectivas sobre estrategias nutricionales orientadas a modular diferentes vías fisiológicas implicadas en la producción de óxido nítrico y en la regulación de la función vascular durante el ejercicio.

6.2. Limitaciones del estudio

El presente estudio presenta diversas limitaciones que deben considerarse en la interpretación de los resultados.

En primer lugar, la duración total del protocolo experimental es relativamente prolongada, lo que incrementa la dificultad de controlar completamente la carga de entrenamiento de los participantes durante el estudio. Aunque se estableció un control de la carga mediante la metodología ECOs (Escala de Carga Objetiva) y se programaron sesiones de entrenamiento de intensidad

media-baja para evitar mejoras significativas derivadas del propio entrenamiento, no puede descartarse que algunas adaptaciones fisiológicas hayan influido en los resultados hipotéticos obtenidos.

En segundo lugar, la muestra del estudio está compuesta exclusivamente por corredores entrenados, lo que limita la extrapolación de los resultados a otras poblaciones deportivas o a individuos recreacionales.

Por último, la duración de cada fase de suplementación fue de siete días. Aunque este periodo se encuentra dentro de los protocolos subcrónicos utilizados en estudios previos sobre suplementación con nitratos.

Dada la duración de este protocolo de suplementación, se debe contemplar la posible reducción del tamaño de la muestra inicial. Las lesiones fortuitas o posibles enfermedades son variables difícilmente controlables que podrían derivar en bajas a lo largo de las semanas de intervención.

6.3. Futuras líneas de investigación

A partir de los resultados hipotéticos del presente estudio, futuras investigaciones podrían profundizar en diferentes aspectos relacionados con la suplementación con nitratos y flavonoles en el contexto del rendimiento deportivo.

En primer lugar, sería interesante analizar protocolos de suplementación combinada durante periodos más prolongados, con el objetivo de determinar si los posibles efectos observados sobre la economía de carrera y el rendimiento se mantienen o incluso se potencian con el tiempo.

Asimismo, futuras investigaciones podrían comparar el efecto de estas estrategias nutricionales en poblaciones con diferentes niveles de entrenamiento, incluyendo atletas recreacionales, subélite y de élite.

Por último, sería interesante profundizar en los mecanismos fisiológicos responsables de la posible interacción entre nitratos y flavonoles, especialmente en relación con la biodisponibilidad del óxido nítrico, la eficiencia mitocondrial y la perfusión muscular durante el ejercicio de

resistencia.

7. Conclusiones

En base a los objetivos planteados y los resultados hipotéticos derivados de la intervención en atletas de mediofondo, se extraen las siguientes:

1. La suplementación con cacao, consumo de remolacha y su combinación no puede reduciría cambios en la velocidad asociada a los umbrales ventilatorios en corredores de medio fondo entrenados durante una prueba incremental hasta el VO_2 máx, lo que confirmaría la primera post tesis planteada.
2. Del mismo modo, ninguna de las condiciones de suplementación analizadas generaría mejoras en el VO_2 máx en corredores entrenados de medio fondo, lo que confirmaría la segunda hipótesis del estudio.
3. La suplementación con zumo de remolacha mejoraría la economía de carrera en corredores de medio fondo, observándose además una tendencia a mayores mejoras cuando se combina con cacao en comparación con su administración aislada, lo que confirmaría la tercera hipótesis.
4. En relación con el rendimiento, la suplementación con zumo de remolacha mejoraría el tiempo en una prueba de 5 km, observándose una mayor mejora con la suplementación combinada respecto a la aislada, lo que confirmaría la cuarta hipótesis planteada.

8. Referencias

- Alsharif, N. S., Clifford, T., Alhebshi, A., Rowland, S. N., & Bailey, S. J. (2023). Effects of dietary nitrate supplementation on performance during single and repeated bouts of short-duration high-intensity exercise: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Antioxidants*, *12*(6), 1194.
- Areta, J. L., Burke, L. M., Ross, M. L. R., Camera, D. M., West, D. W. D., Broad, E. M., Jeacocke, N. A., Moore, D. R., Stellingwerff, T., Phillips, S. M., & Hawley, J. A. (2013). Timing and distribution of protein ingestion during prolonged recovery from resistance exercise alters myofibrillar protein synthesis. *Journal of Physiology*, *591*(9), 2319–2331.
- Australian Institute of Sport. (2023). *Sports supplement framework*.
- Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Running economy: Measurement, norms, and determining factors. *Sports Medicine - Open*, *1*(8).
- Bassett, D. R., & Howley, E. T. (2000). Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *32*(1), 70–84.
- Bergström, J., & Hultman, E. (1967). Muscle glycogen synthesis after exercise: An enhancing factor localized to the muscle cells in man. *Nature*, *210*(5033), 309-310.
- Bompa, T. O., & Buzzichelli, C. (2019). *Periodización: teoría y metodología del entrenamiento*. Paidotribo.
- Brick, N., MacIntyre, T., & Campbell, M. (2016). Metacognitive processes in the self- regulation of performance in elite endurance runners. *Psychology of Sport and Exercise*, *27*, 1-9.
- Burke, L. M. (2021). Re-examining high-fat diets for sports performance: Did we call the “nail in the coffin” too soon? *Sports Medicine*, *51*(1), 1-8.

Burke, L. M., Hawley, J. A., Wong, S. H. S., & Jeukendrup, A. E. (2011). Carbohydrates for training and competition. *Journal of Sports Sciences*, 29(Suppl. 1), S17-S27.

Burke, L. M., Ross, M. L. R., Garvican-Lewis, L. A., Welvaert, M., Heikura, I. A., Forbes, S. G., Mirtschin, J. G., Cato, L. E., Strobel, N., Sharma, A. P., & Hawley, J. A.

(2018). Toward a common understanding of diet–exercise strategies to manipulate fuel availability for training and competition preparation in endurance sport. *International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism*, 28(5), 451-463.

Clifford, T., Bell, O., West, D. J., Howatson, G., & Stevenson, E. J. (2021). Cocoa flavanols enhance oxygen uptake kinetics during moderate-intensity exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 121(4), 1121-1132.

Clifford, T., et al. (2021). Effects of dietary nitrate supplementation on exercise performance: A review. *Nutrients*, 13(1), 1-25.

Coyle, E. F. (1995). Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 23, 25-63.

Currell, K., & Jeukendrup, A. E. (2008). Superior endurance performance with ingestion of multiple transportable carbohydrates. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(2), 275-281.

Davison, G., Clarke, N., & Davies, B. (2017). The effect of cocoa flavanols on exercise-induced oxidative stress and nitric oxide production. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 14(1), 28.

Davison, G., et al. (2022). Cocoa flavanols and human exercise performance: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 52(2), 333–355.

Decroix, L., Tonoli, C., Soares, D. D., Descat, A., Drikkj-Reijnders, M. J., Weseler, A. R., Stahl, W., Heyman, E., & Meeusen, R. (2017). Acute cocoa

flavanols intake has minimal effects on exercise-induced oxidative stress and nitric oxide production in healthy cyclists: A randomized controlled trial. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 14(1), 28.

Decroix, L., Soares, D. D., et al. (2021). The effects of cocoa flavanols on indices of muscle recovery and exercise performance: A narrative review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, 13(1), 1–15.

Domínguez, R., Siemers, E., et al. (2020). Ergogenic effect of nitrate supplementation: A systematic review and meta-analysis. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 52, 2250–2260.

García-Merino, J. Á., Moreno-Pérez, D., de Lucas, B., et al. (2020). Chronic flavanol- rich cocoa powder supplementation reduces body fat mass in endurance athletes by modifying the follistatin/myostatin ratio and leptin levels. *Food & Function*, 11(4), 3289–3298.

García-Merino, J. Á., de Lucas, B., Herrera-Rocha, K., Moreno-Pérez, D., Montalvo- Lominchar, M. G., Fernández-Romero, A., Santiago, C., Pérez-Ruiz, M., & Larrosa, M. (2022). Flavanol-rich cocoa supplementation inhibits mitochondrial biogenesis triggered by exercise. *Antioxidants*, 11(8), 1522.

Gómez-Cabrera, M. C., et al. (2008). Exercise as an antioxidant: It up-regulates antioxidant genes by activating the Nrf2 factor. *Free Radical Biology and Medicine*, 44(2), 126–131.

Hawley, J. A., et al. (2014). Integrative biology of exercise. *Cell*, 159(4), 738–749.

Holloszy, J. O., & Coyle, E. F. (1984). Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. *Journal of Applied Physiology*, 56(4), 831– 838.

Jones, A. M., et al. (2016). Physiological determinants of endurance performance. *Sports Medicine*, 46(6), 951–969.

Joyner, M. J., & Coyle, E. F. (2008). Endurance exercise performance: The physiology of champions. *Journal of Physiology*, 586(1), 35–44.

López-Samanes, Á., et al. (2020). Effects of beetroot juice supplementation on endurance and neuromuscular performance in cyclists. *Nutrients*, 12(2), 390.

Mountjoy, M., et al. (2018). IOC consensus statement on Relative Energy Deficiency in Sport (RED-S): 2018 update. *British Journal of Sports Medicine*, 52(11), 687–697.

Thomas, D. T., Erdman, K. A., & Burke, L. M. (2016). Position of the Academy of Nutrition and Dietetics, Dietitians of Canada, and the American College of Sports Medicine: Nutrition and athletic performance. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 116(3), 501–528.

Wylie, L. J., Kelly, J., Bailey, S. J., Blackwell, J. R., Vanhatalo, A., & Jones, A. M. (2013). Influence of beetroot juice supplementation on intermittent exercise performance. *European Journal of Applied Physiology*, 113(7), 1673–1682

