



**Universidad
Camilo José Cela**
SEK EDUCATION GROUP

FACULTAD DE SALUD

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Tesis Doctoral

**EFFECTOS DE LA INGESTA AGUDA Y PROLONGADA DE
CAFEÍNA SOBRE EL RENDIMIENTO NEUROMUSCULAR**

Tesis que presenta D^a. Verónica Giráldez Costas para optar al grado de doctor, realizada bajo la dirección del Dr. D. Juan Del Coso Garrigós y tutorizada por el Dr. D. Juan José Salinero Martín.

Madrid, 2023

A mis padres, Marina y Serafín.
A Laura.
Gracias por dejarme ser.

Mientras escribo estas líneas, no puedo evitar emocionarme al recordar todas las personas que han estado a mi lado durante este largo camino. Seguramente, no lo he verbalizado lo suficiente, y quizás hoy es el momento de recordar que gracias a todos ellos soy mejor profesional, pero sobre todo mejor persona. No puedo encontrar las palabras adecuadas para describir lo agradecida que estoy por teneros en mi vida. Sin vosotros no hubiera sido posible. Durante este proceso he aprendido que la paciencia es la madre de la ciencia y que el pilar fundamental es la constancia, la humildad y el compañerismo. Gracias de corazón.

En primer lugar, quiero agradecer a la Universidad Camilo José Cela y a la Comunidad de Madrid por brindarme la posibilidad de disfrutar de una beca pre-doctoral y haberme permitido realizar la presente Tesis Doctoral.

A todos los participantes de cada investigación, a quienes les agradezco de corazón su disposición y colaboración. Sin su valiosa contribución, esta Tesis Doctoral no habría sido posible. Agradezco sinceramente el tiempo y esfuerzo que dedicaron para llevar a cabo cada una de las investigaciones.

A los co-autores de cada una de las investigaciones que forman parte de la Tesis Doctoral, y que sin su contribución no podría haber llegado hasta aquí.

A Blanca por poner la primera semilla. Has sido la primera persona que me animó a empezar este largo y maravilloso camino. El mundo del fútbol, especialmente femenino, tiene mucho que agradecerte.

A mis compañeros de la UCJC, gracias por ser una fuente constante de apoyo y compañerismo. Admiro vuestra capacidad para apoyaros mutuamente, compartir

conocimientos y superar desafíos juntos. Agradezco enormemente vuestra cariñosa acogida, desde los Koalas hasta todo el personal docente. Cuando una está lejos de sus amigos y de su familia, tener a personas tan humanas y con tanto corazón cerca hace que esa morriña sea un poquito más pequeña. No cambio por nada del mundo cada viajero, viaje, “debate”, comida y charleta que hemos disfrutado. Compartir este camino con todos vosotros ha sido un enorme placer. Este trabajo es, en gran parte, gracias a vosotros. Cada uno habéis dejado una huella imborrable en mí y os llevaré siempre conmigo. Gracias a STreNgtP por hacerme crecer tanto a nivel profesional como personal. Quiero hacer una mención especial a cuatro personas que sin duda han marcado la diferencia. Bea, Carlos, Ester y María, gracias de corazón por abrirme las puertas de vuestra casa y cuidarme como lo habéis hecho. Estoy segura de que seguiremos persiguiendo sueños juntos.

A mi director de tesis, Juan del Coso, por guiarme y enseñarme como se saca una “buena hamburguesa”. Gracias Juan. Aparte de ser un verdadero genio, eres un ejemplo de que la clave del éxito es la perseverancia, el trabajo y el sacrificio. Ha sido un auténtico privilegio poder aprender a tu lado.

A mi tutor, Juanjo, por ser el espejo al que me quiero mirar. En un mundo tan competitivo es muy difícil encontrarse a alguien que, siendo tan brillante, desprende tanta generosidad y humildad. Tus conocimientos profundos, tu experiencia, tu disposición y tu visión han sido fundamentales para dar forma a esta Tesis Doctoral. Estaré eternamente agradecida.

A mis amigos, la familia que se elige. Gracias por escuchar todas mis ideas e investigaciones y hacer como que entendáis de lo que os hablaba. Habéis sido en muchas ocasiones una vía de escape, un salvavidas. Gracias a Carlos, por empezar siendo un compañero de tesis hasta convertirse en un verdadero amigo. Gracias de corazón por abrirme las puertas de tu casa y tratarme como alguien de la familia. Gracias a Susana y a Ale por celebrar como si fuera vuestra la resolución de la beca. Gracias a Darío y a Sergio por ser amigos de la infancia sin serlo. Y por supuesto, gracias a mis pontakas por estar siempre mi lado y verme crecer.

A mis padres, Marina y Serafín, por su amor, apoyo y sacrificio. Desde el principio, creyeron en mí y me brindaron todo el apoyo necesario para perseguir mis sueños. Gracias por creer en mi cuando yo misma no lo hacía y gracias por vuestra confianza para superar los obstáculos y perseverar incluso en los momentos más difíciles. Quérovos moito.

Y finalmente a la persona que más ha sufrido este proceso, gracias por ser mi bastón en este viaje. Tu paciencia, comprensión y amor incondicional me han sostenido en los momentos de estrés y agotamiento. Tus palabras de ánimo y tu apoyo me ayudaron a mantener la claridad y la determinación en los momentos en que dudaba de mí misma. Tu más que nadie ha vivido lo bueno y lo malo de este viaje. Gracias por celebrar cada éxito como si fuera tuyo. Te quiero Laura.

Con todo mi amor y gratitud,

Vero

Índice

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS _____	12
ÍNDICE DE TABLAS _____	14
ÍNDICE DE FIGURAS _____	16
RESUMEN _____	24
ABSTRACT _____	28
MARCO TEÓRICO _____	34
Historia de la cafeína y su evolución en la ciencia y en el deporte desde la perspectiva del rendimiento neuromuscular _____	34
Ingesta de cafeína y rendimiento deportivo _____	38
Mecanismos de acción de la cafeína _____	40
Metabolismo de la cafeína _____	46
Protocolos de suplementación de la cafeína: fuentes, dosis y timing _____	48
Ingesta de cafeína y rendimiento neuromuscular _____	54
Efectos de la cafeína en la 1RM _____	56
Efectos de la cafeína sobre la fuerza isométrica _____	57
Efectos de la cafeína sobre la resistencia muscular _____	58
Ingesta crónica de cafeína y su posible tolerancia _____	62
Efectos secundarios de la ingesta de cafeína _____	64
Variabilidad interindividual y genética _____	66
Diferencias en función del sexo y posible efecto del ciclo menstrual _____	70
OBJETIVOS _____	74
4.1 Objetivo general _____	74
4.2 Objetivos específicos _____	74
HIPÓTESIS _____	78
ESTUDIOS QUE CONFORMAN LA TESIS DOCTORAL _____	82
ESTUDIO 1. EL LARGO CAMINO PARA ESTABLECER EL EFECTO ERGOGÉNICO DE LA CAFEÍNA EN EL RENDIMIENTO NEUROMUSCULAR: REVISIÓN GENERAL _____	86
ESTUDIO 2. LA CAFEÍNA AUMENTA EL RENDIMIENTO NEUROMUSCULAR DURANTE UNA SESIÓN DE ENTRENAMIENTO DE <i>PRESS BANCA</i> _____	100
ESTUDIO 3. LA INGESTA DE CAFEÍNA ANTES DEL EJERCICIO MEJORA LAS ADAPTACIONES DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA EN <i>PRESS BANCA</i> _____	110

ESTUDIO 4. LA SUPLEMENTACIÓN CON CAFEÍNA MEJORA VARIOS ASPECTOS DEL RENDIMIENTO EN LANZAMIENTO DE PESO EN ATLETAS ENTRENADOS	122
ESTUDIO 5. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA TOLERANCIA EN EL RENDIMIENTO NEUROMUSCULAR, EN LA CONCENTRACIÓN DE CAFEÍNA EN ORINA Y EN LOS EFECTOS SECUNDARIOS ASOCIADOS A UNA INGESTA MODERADA DE CAFEÍNA	134
DISCUSIÓN	152
Evolución en la investigación sobre cafeína y deporte desde la perspectiva del rendimiento neuromuscular	154
Ingesta aguda de cafeína y rendimiento neuromuscular	158
Ingesta crónica de cafeína y su posible tolerancia	162
Efectos secundarios asociados a la ingesta de cafeína	166
LIMITACIONES DE LA TESIS DOCTORAL	172
CONCLUSIONES	176
APLICACIONES PRÁCTICAS	180
CONFLICTO DE INTERÉS	184
BIBLIOGRAFÍA	188
Anexo 1: Excel estudio 1	206
Anexo 2: Informes favorables del comité de ética para los estudios experimentales	208
Anexo 3: Congresos	209
Anexo 4: Artículos publicados de la tesis	212

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

1RM = Una repetición máxima

AIS = Instituto Australiano del Deporte (por sus siglas en inglés *Australian Institute of Sport*)

AMA = Agencia Mundial Antidopaje

ANOVA = Análisis de varianza (por sus siglas en inglés *Analysis of Variance*)

AGL = Ácidos Grasos Libres

ATP = Adenosín Trifosfato

CMJ = Salto con contramovimiento (por sus siglas en inglés *Countermovement Jump*)

COI = Comité Olímpico Internacional

e.g. = Por ejemplo (de la expresión latina *exempli gratia*)

ES = Tamaño del efecto (por sus siglas en inglés *effect size*)

FC = Frecuencia cardíaca

FFQ = Cuestionario de Frecuencia Alimentaria (por sus siglas en inglés *Food Frequency Questionnaire*)

IC = Intervalo de confianza

ICC = Coeficiente de Correlación Intraclase (por sus siglas en inglés *Intraclass Correlation Coefficient*)

i.e. = Es decir (de la expresión latina *id est*)

ISSN = *Sociedad Internacional de Nutrición Deportiva* (por sus siglas en inglés *International Society of Sports Nutrition*)

JCR = *Journal Citation Reports*

MDC = Cambio mínimo detectable (por sus siglas en inglés *Minimum Detectable Change*)

MR = Medidas repetidas

Nº = Número

PB = *Press banca*

RFD = Índice de desarrollo de la fuerza (por sus siglas en inglés *Rate of Force Development*)

RPE = Esfuerzo percibido (por sus siglas en inglés *Rate of Perceived Exertion*)

SD = Desviación Estándar (por sus siglas en inglés *Standard Deviation*)

SEM = Error estándar de medida (por sus siglas en inglés *Standard Error of Measurement*)

SJ = Salto sin contramovimiento (por sus siglas en inglés *Squat jump*)

SNC = Sistema Nervioso Central

VO₂ = Consumo de oxígeno

VT₂ = Segundo umbral ventilatorio

% = Porcentaje

~ = Aproximadamente

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de cafeína en diferentes alimentos, bebidas y preparados disponibles comercialmente.	49
Tabla 2. Publicaciones científicas derivadas de los estudios que conforman la Tesis Doctoral.	83
Tabla 3. Esquema con las principales características metodológicas y principales resultados de los estudios que conforman esta Tesis Doctoral.	84
Tabla 4. Criterios de búsqueda completos para las bases de datos.	87
Tabla 5. Evolución de las principales características de los diseños experimentales de las investigaciones sobre los efectos de la cafeína en el rendimiento de fuerza.	98
Tabla 6. Variables de rendimiento neuromuscular durante una sesión de entrenamiento de <i>press banca</i> que consiste en 4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o de placebo.	106
Tabla 7. Variables de CMJ, SJ y Push-up balístico tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o de placebo.	130
Tabla 8. Prevalencia de efectos secundarios las horas posteriores a la ingesta de cafeína o placebo. Los datos muestran los porcentajes de respuestas afirmativas obtenidas de 10 atletas entrenados.	133

Tabla 9. Capacidad de fuerza percibida (escala de 1-10 puntos) tras la prueba de ejercicio de *press banca* con la administración de 3 mg/kg/día de cafeína o un placebo durante 22 días consecutivos. 146

Tabla 10. Valores de efectos secundarios percibidos con la administración de 3 mg/kg/día de cafeína o un placebo durante 22 días consecutivos. 149

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Moléculas de cafeína bloqueando los receptores de adenosina en el cerebro (elaboración propia).	41
Figura 2. Ilustración propia sobre la sobreestimulación de los receptores de adenosina.	44
Figura 3. Ilustración propia sobre la ingesta de cafeína y su forma, dosis y timing.	52
Figura 4. Factores genéticos y no genéticos que pueden influir en las decisiones sobre la ingesta de cafeína. Adaptación de Pickering y Kiely ¹⁵⁵ .	68
Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de búsqueda y selección.	89
Figura 6. Número de artículos publicados según el tamaño de la muestra y el sexo de los participantes. La línea interior de la caja representa la mediana y el aspa (x) la media. Los bordes superior e inferior representan el percentil 75 y 25.	92
Figura 7. Frecuencia de los estudios publicados sobre el efecto de la cafeína en el rendimiento de fuerza en función del uso (o no) de una dosis de cafeína ajustada a la masa corporal (a) , combinación de cafeína con otras sustancias (b) , relación con otras sustancias co-ingridas (c) , situación controlada con placebo (d) , reporte de consumo habitual de cafeína de los participantes (e) e información sobre efectos secundarios asociados a la cafeína (f) .	94

- Figura 8.** Diseño experimental de la investigación. Los participantes se sometieron a un protocolo de 4 series y 8 repeticiones al 70% de su 1RM del ejercicio de *press banca*. Antes de cada sesión, los participantes ingirieron una cápsula que contenía 3 mg/kg de cafeína o un placebo en un orden aleatorio. // 1RM: una repetición máxima. 101
- Figura 9.** Participante realizando el entrenamiento de *press banca* en máquina guiada. Imagen propia. 104
- Figura 10.** Velocidad máxima y velocidad media durante una sesión de entrenamiento de *press banca* consistente en 4 series de 8 repeticiones al 70% de su 1RM tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o placebo. Los datos se muestran como media \pm SD para cada repetición realizada en la sesión en 12 individuos. (*) Diferencias significativas entre cafeína y placebo a $p < 0.05$. //1RM: una repetición máxima. 107
- Figura 11.** Trabajo total ejecutado durante una sesión de entrenamiento de *press banca* consistente en 4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o de placebo. El trabajo total realizado en el entrenamiento se calculó sumando el trabajo producido en cada repetición del ejercicio de *press banca*. Cada línea representa a un individuo de una muestra de 12 individuos. (*) Diferencias significativas entre cafeína y placebo a $p < 0.05$. //1RM: una repetición máxima. 108
- Figura 12.** Participante realizando la prueba de la 1RM (imagen de la izquierda) y test incremental en el *press banca* en máquina guiada (imagen de la derecha). Imágenes propias. // 1RM: una repetición máxima. 112
- Figura 13.** Diseño experimental de la investigación. Los participantes se sometieron a un protocolo de entrenamiento de fuerza consistente en 12 sesiones de entrenamiento en el ejercicio de *press banca* durante 4 semanas. Durante las 2 primeras semanas, los participantes realizaron 4 series de 10 repeticiones al 60% 1RM y en las 2 últimas semanas realizaron 4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM. Antes de cada sesión de entrenamiento, 9

participantes ingirieron una cápsula que contenía 3 mg/kg de cafeína **(A)** y 7 participantes ingirieron una cápsula que contenía placebo **(B)**. Antes y después del protocolo de entrenamiento de fuerza, los participantes realizaron una prueba de la 1RM en el ejercicio de *press banca* y una prueba de fuerza-velocidad utilizando cargas incrementales. // 1RM: una repetición máxima. 113

Figura 14. Cambio en el valor de la 1RM en el ejercicio de *press banca* después de un protocolo de entrenamiento de resistencia de 4 semanas (12 sesiones de entrenamiento) con la ingesta de 3 mg/kg de cafeína (n = 9) o de placebo (n = 7) antes de cada sesión de entrenamiento. Los datos se muestran como media \pm SD. (*) Diferencia entre pre-entrenamiento y post-entrenamiento dentro del mismo grupo a $p < 0.05$. // 1RM: una repetición máxima. 117

Figura 15. Velocidad media **(A)** y velocidad máxima **(B)** durante un ejercicio de *press banca* con diferentes cargas (del 10 al 100% 1RM) antes y después de 4 semanas de entrenamiento de resistencia (12 sesiones de entrenamiento) con la ingesta de 3 mg/kg de cafeína (n = 9) o de placebo (n = 7) antes de cada sesión de entrenamiento. Los datos se muestran como media \pm SD para cada carga. (*) Diferencia entre pre-entrenamiento y post-entrenamiento dentro del mismo grupo a $p < 0.05$. // 1RM: una repetición máxima. 118

Figura 16. Potencia media **(A)** y potencia máxima **(B)** durante un ejercicio de *press banca* con diferentes cargas (del 10 al 100% 1RM) antes y después de 4 semanas de entrenamiento de resistencia (12 sesiones de entrenamiento) con la ingesta de 3 mg/kg de cafeína (n = 9) o de placebo (n = 7) antes de cada sesión de entrenamiento. Los datos se muestran como media \pm SD para cada carga. (*) Diferencia entre pre-entrenamiento y post-entrenamiento dentro del mismo grupo a $p < 0.05$. // 1RM: una repetición máxima. 120

Figura 17. Diseño experimental de la investigación. Trece lanzadores de peso se sometieron a unas pruebas de rendimiento que consistían en el ejercicio de dinamometría manual, salto de CMJ y SJ, push-up balístico y lanzamientos de peso (hacia atrás, parado y completo). Antes de cada protocolo, los

- participantes ingirieron una cápsula que contenía 3 mg/kg de cafeína o un placebo en un orden aleatorio. 124
- Figura 18.** Deportistas realizando un salto CMJ (imagen de la izquierda) y SJ (imagen de la derecha). Imágenes propias. 125
- Figura 19.** Deportista realizando el ejercicio de push-up balístico. Imagen y vídeo propios (QR). 126
- Figura 20.** Lanzamientos de peso. Lanzamiento hacia atrás (imagen de la izquierda), lanzamiento desde parado (imagen central) y lanzamiento completo (imagen de la derecha). Imagen y vídeo propios (QR). 128
- Figura 21.** Respuestas individuales para la distancia (m) durante el lanzamiento tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o de placebo. Cada línea representa a un individuo de una muestra de 13 individuos; las líneas continuas representan a los atletas que aumentaron la distancia con cafeína respecto al placebo y la línea discontinua a los atletas que disminuyeron la distancia con cafeína respecto al placebo. (*) Diferencias significativas entre cafeína y placebo para $p < 0.05$. 132
- Figura 22.** Diseño experimental de la investigación. Doce participantes se sometieron a un ejercicio de *press banca* incremental el día 0 (línea de base) y los días 1, 4, 6, 8, 11, 13, 15, 18, 20 y 22. Antes de cada sesión de entrenamiento (excepto el día 11, que se ingirió después), los participantes ingirieron una cápsula que contenía cafeína (3 mg/kg) o un placebo durante 22 días consecutivos en un orden aleatorio. //1RM: una repetición máxima. 137
- Figura 23.** Participante realizando el ejercicio de *press banca* en máquina guiada. Imagen y vídeo propios (QR). 140
- Figura 24.** Imagen de las muestras de orina. Imágenes propias. 141
- Figura 25.** Frecuencia cardiaca en reposo (A), presión arterial diastólica (B) y presión arterial sistólica (C) tras la ingesta de 3 mg/kg/día de cafeína o un

placebo durante 22 días consecutivos. (*) Diferencias entre placebo y 3 mg/kg para el mismo día ($p < 0.05$). (#) Diferencias respecto al día 1 dentro del mismo tratamiento, $p < 0.05$. Los datos se presentan como media \pm SD. 144

Figura 26. Velocidad media (m/s) obtenida durante un ejercicio de *press banca* tras la ingesta de 3 mg/kg/día de cafeína o placebo durante 22 días consecutivos. El panel 1 muestra los datos presentados como media \pm SD. (*) Cafeína diferente del placebo para el mismo día, $p < 0.05$. El panel 2 muestra el tamaño del efecto ($\pm 95\%$ intervalos de confianza) para todas las comparaciones por pares. A: 30% 1RM; B: 45% 1RM; C: 60% 1RM; D: 75% 1RM; y E: 90% 1RM. //1RM: una repetición máxima. 145

Figura 27. Concentraciones de cafeína (panel A) y paraxantina (panel B) en orina con la administración de 3 mg/kg/día de cafeína o un placebo durante 22 días consecutivos. (*) Diferencias entre placebo y 3 mg/kg para el mismo día, $p < 0.05$. (#) Diferencias respecto al día 1 dentro del mismo tratamiento, $p < 0.05$. Los datos se presentan como media \pm SD. 148



1

RESUMEN

1

RESUMEN

La cafeína (1,3,7 trimetilxantina) es una de las sustancias más consumidas en el mundo, a pesar de carecer de valor nutricional. En el ámbito deportivo, la administración de suplementos de cafeína es una estrategia muy utilizada para mejorar el rendimiento físico. Aproximadamente, 3 de cada 4 atletas de alto rendimiento tienen cafeína en la orina post-competición, indicativo de que utilizan suplementos de cafeína antes o durante la competición. Gran parte de la bibliografía sobre los efectos beneficiosos de esta sustancia en el ejercicio se ha centrado históricamente en el rendimiento aeróbico. Sin embargo, existe una falta de consistencia sobre la existencia de beneficios de la cafeína y su magnitud en el rendimiento neuromuscular que llega incluso a las revisiones sistemáticas, donde se han observado resultados contradictorios del beneficio de la cafeína a pesar de meta-analizar las mismas variables neuromusculares. Además, el análisis del efecto de la cafeína en el rendimiento neuromuscular se ha basado en investigaciones con una ingesta aguda mientras se desconoce el efecto de la ingesta prolongada de cafeína y la posible tolerancia desarrollada a esta sustancia. Asimismo, la literatura científica en este tema se ha basado en test neuromusculares y se desconoce el beneficio real de la suplementación con cafeína en situaciones de expresión de fuerza próximas a la situación deportiva real, como los entrenamientos de fuerza. Por ello, es necesario más información acerca del efecto de la cafeína en el rendimiento neuromuscular con el uso de una ingesta prolongada y en un contexto más ecológico, ya que rara vez se ha investigado el efecto de esta sustancia en deportes con una clara expresión de fuerza como son los saltos o los lanzamientos atléticos.

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral fue investigar y evaluar los efectos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular, utilizando una ingesta aguda y prolongada de

esta sustancia. Para cumplir este objetivo se planteó una revisión general de la literatura científica y cuatro investigaciones experimentales con un diseño de medidas repetidas mediante protocolos controlados con placebo, empleando una metodología doble ciego, aleatorizada y contrabalanceada.

En el Estudio 1 se realizó una revisión para describir la evolución de las características de la investigación sobre los efectos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular. Este estudio de revisión incluyó un total de 189 estudios experimentales con 3459 participantes. El análisis de los estudios incluidos reflejó que el patrón en el estudio de los efectos de la cafeína sobre el rendimiento neuromuscular se ha llevado a cabo con experimentos que incluían entre 11 y 15 adultos, con una sobrerrepresentación de hombres frente a mujeres (79,4 vs. 20,6%, respectivamente), utilizando una dosis única y moderada de cafeína ajustada a la masa corporal de los participantes en forma de cápsula. Con esta revisión se identificaron límites conceptuales, como la escasez de estudios con dosis de cafeína inferiores a 2 mg/kg o superiores a 9 mg/kg, y sirvió para el planteamiento de futuras investigaciones, como el estudio de los efectos de la cafeína sobre la fuerza en contextos más ecológicos asociados al entrenamiento de fuerza, el estudio de ingestas prolongadas y la necesidad de incluir más mujeres en las muestras de estudio, junto con la identificación de la frecuencia y magnitud de los efectos secundarios asociados a la cafeína.

En el Estudio 2 se investigó el efecto de una ingesta aguda de cafeína (3 mg/kg) sobre variables de rendimiento neuromuscular durante una sesión de entrenamiento de *press banca* (4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM realizadas a velocidad máxima). En este estudio se utilizó una muestra de 12 participantes que formaron parte de un diseño experimental doble ciego, aleatorizado y contrabalanceado que tuvo dos pruebas experimentales tras ingerir 3 mg/kg de cafeína o placebo. En comparación con el placebo, la ingesta aguda de cafeína antes de un entrenamiento de fuerza en el ejercicio de *press banca* aumentó la velocidad media y máxima de ejecución, la fuerza media, la potencia media y máxima y trabajo mecánico total durante el entrenamiento. Así pues, la cafeína puede considerarse una estrategia eficaz para mejorar el rendimiento

neuromuscular durante las sesiones de entrenamiento de *press banca* basadas en la velocidad de ejecución.

En el Estudio 3 se investigó el efecto de la ingesta de cafeína antes del ejercicio en las adaptaciones al entrenamiento inducidas por un protocolo de entrenamiento de *press banca* de 4 semanas (12 sesiones). Siete participantes ingirieron un placebo y nueve participantes ingirieron 3 mg/kg de cafeína antes de cada sesión de entrenamiento que fueron medidas con un encoder lineal. La ingesta de cafeína antes del ejercicio no modificó las mejoras en 1RM obtenidas durante el programa de entrenamiento de fuerza, pero produjo mayores incrementos en la velocidad y la potencia neuromuscular con respecto al placebo en cargas del 30% al 100% 1RM. Por lo tanto, la cafeína puede incrementar algunas adaptaciones al entrenamiento de fuerza, especialmente en lo relacionado a la producción de potencia muscular en cargas submáximas.

En el Estudio 4 se investigó el efecto de una dosis aguda de cafeína sobre la potencia neuromuscular, pruebas de rendimiento específicas del lanzamiento de peso y sobre un lanzamiento de peso reglamentario en lanzadores de peso entrenados. Trece lanzadores de peso (8 hombres y 5 mujeres) participaron en un diseño experimental doble ciego, cruzado, controlado con placebo y aleatorizado. En dos pruebas experimentales, los participantes ingirieron 3 mg/kg de cafeína o placebo antes de las pruebas de rendimiento neuromuscular (medidas con plataforma de fuerzas) y las mediciones reglamentarias de los tres tipos de lanzamiento de peso. En comparación con el placebo, la ingesta de cafeína aumentó el rendimiento en el salto sin contramovimiento (SJ), salto con contramovimiento (CMJ) y en el lanzamiento de peso desde parado en lanzadores de peso entrenados, pero con un efecto pequeño sobre la distancia en un lanzamiento de peso completo. Asimismo, no aumentó la prevalencia de efectos secundarios en las horas siguientes al ejercicio. De manera que los lanzadores de peso podrían incorporar el uso de la cafeína como estrategia eficaz para potenciar su rendimiento.

En el Estudio 5 se investigó la existencia y el curso temporal de la tolerancia a la ingesta crónica de cafeína en los efectos ergogénicos en el ejercicio de *press banca*, en las concentraciones de cafeína y paraxantina en orina, y en los posibles efectos adversos

cuando se ingiere 3 mg/kg de cafeína durante de 22 días consecutivos. Se utilizó una muestra de 12 participantes que formaron parte de dos protocolos. En un protocolo, los participantes ingirieron 3 mg/kg durante 22 días consecutivos, mientras que en otro ingirieron un placebo. Tres veces por semana (11 días en total) dentro de cada tratamiento, se midió la concentración de cafeína y paraxantina en orina y la velocidad de ejecución del ejercicio de *press banca*. En comparación con el placebo, la ingesta diaria de cafeína indujo una elevación inicial y presentó posteriormente una tolerancia progresiva, en la velocidad media en el *press banca*, en la concentración de cafeína y paraxantina en orina y en la presión arterial. Estos datos muestran la existencia de una tolerancia progresiva en el rendimiento neuromuscular y en la concentración de cafeína en orina cuando se consume de manera crónica, teniendo en cuenta que la magnitud del efecto ergogénico fue mayor el primer día de ingesta.

En resumen, esta Tesis Doctoral indica que la cafeína es una sustancia que, si se toma de manera aguda y en una dosis de 3 mg/kg, tiene la capacidad de incrementar el rendimiento neuromuscular en entrenamientos de fuerza basados en la velocidad de ejecución o en disciplinas de fuerza, como el lanzamiento de peso. Además, cuando se consume de manera crónica puede incrementar algunas adaptaciones al entrenamiento de fuerza, aunque existe una cierta tolerancia progresiva a los efectos beneficiosos de esta sustancia cuando se consume durante 22 días consecutivos. Estos datos indican que la cafeína es un agente con un efecto ergogénico potente para disciplinas de fuerza, aunque la suplementación con esta sustancia debería planificarse con ingestas esporádicas en entrenamientos o competiciones claves para evitar la tolerancia. Así, los profesionales de las ciencias del deporte y los nutricionistas podrían pautar el uso de la cafeína en sus planificaciones deportivas, pero teniendo en cuenta los inconvenientes de su suplementación cuando se consume diariamente.

2

ABSTRACT

Caffeine (1,3,7 trimethylxanthine) is one of the most widely consumed substances in the world, despite its lack of nutritional value. In sports, caffeine supplementation is a widely used strategy to improve physical performance. Approximately 3 out of 4 high-performance athletes have caffeine in their post-competition urine, indicating that they likely used caffeine supplements before or during competition. Much of the literature on the beneficial effects of this substance in exercise has historically focused on aerobic performance. However, there is a lack of consistency on the existence of caffeine benefits and their magnitude on neuromuscular performance that extends even to systematic reviews, where contradictory results of caffeine benefits have been observed despite meta-analyzing the same neuromuscular variables. Moreover, the analysis of the effect of caffeine on neuromuscular performance has been based on investigations with an acute intake of the substance while the effect of chronic caffeine intake and the possible tolerance developed to this substance is unknown. Last, the scientific literature on this topic has been based on neuromuscular tests and the real benefit of caffeine supplementation in real exercise situation that require high values of strength, such as strength training or strength-based sports competitions, is unknown. Therefore, more information is needed on the effect of caffeine on neuromuscular performance with the use of chronic intake and in more ecological sports contexts.

The main objective of this Doctoral Thesis was to investigate and evaluate the effects of caffeine on neuromuscular performance, using an acute and chronic intake of this substance. To meet this objective, a general review of the scientific literature and four

experimental investigations with a repeated-measures, double-blind and randomization of placebo and caffeine trials, were proposed.

In Study 1, a review was conducted to describe the evolving characteristics of research on the effects of caffeine on neuromuscular performance. This review study included a total of 189 experimental studies with 3459 participants. Analysis of the included studies reflected that the pattern in the research of the effects of caffeine on neuromuscular performance has been conducted with experiments involving 11 to 15 adults, with an overrepresentation of males versus females (79.4 vs. 20.6%, respectively), using a single and moderate dose of caffeine adjusted to the body mass of the participants in capsule form. With this review, conceptual limits were identified, such as the paucity of studies with caffeine doses lower than 2 mg/kg of body mass or higher than 9 mg/kg, and served as an approach for future research, such as the study of the effects of caffeine on strength in more ecological sports contexts, the study of the effect of chronic intake of caffeine, and the need to include more women in the study samples, along with a more thorough identification of the frequency and magnitude of side effects associated with caffeine.

In Study 2, the effect of an acute caffeine intake (3 mg/kg) on neuromuscular performance variables during a velocity-based bench press training session (4 sets of 8 repetitions at 70% 1RM performed at maximum velocity) was investigated. This study used a sample of 12 participants in a double-blind, randomized, counterbalanced experimental design that had two experimental trials after ingesting either 3 mg/kg of caffeine or a placebo. Neuromuscular performance during bench press exercise was measured with a linear encoder. Compared to the placebo, acute caffeine ingestion prior to the bench press training session increased average and maximal velocity of execution, average strength, average and maximal power, and the total mechanical work. Thus, caffeine can be considered an effective strategy to improve neuromuscular performance during velocity-based bench press training sessions.

In Study 3, the effect of pre-exercise caffeine intake on training adaptations induced by a 4-week (12 sessions) bench press training protocol were investigated. Seven

participants ingested a placebo and nine participants ingested 3 mg/kg caffeine before each training session of the training protocol while neuromuscular performance during bench press exercise was measured with a linear encoder. Pre-exercise caffeine ingestion did not modify the gains in 1RM obtained during the strength training program with the placebo, but produced greater increases in velocity and neuromuscular power at loads from 30% to 100% 1RM than the placebo. Therefore, caffeine may increase some adaptations to strength training, especially adaptations associated with muscle power production at submaximal loads.

In Study 4, the effect of an acute dose of caffeine on neuromuscular power, shot put-specific performance tests and on a regulation shot put in trained was investigated in trained and experienced shot putters. Thirteen shot putters (8 males and 5 females) participated in a double-blind, crossover, placebo-controlled, randomized experimental design. In two experimental trials, participants ingested either 3 mg/kg caffeine or placebo before a battery of neuromuscular performance tests (force platform measurements) and regulatory measurements of the three types of shot put. Compared to placebo, caffeine intake increased performance in the squat jump, countermovement jump and the distance obtained in a standing shot put, but caffeine had a small effect on distance in a complete shot put. Likewise, caffeine intake did not increase the prevalence of side effects in the hours following exercise with respect to the placebo. So shot putters could incorporate the use of caffeine as an effective strategy to enhance their performance.

In Study 5, we investigated the existence and time course of tolerance to the ergogenic effects of caffeine intake for 22 days in bench press exercise, to the urinary caffeine and paraxanthine concentrations, and to possible adverse effects. A sample of 12 participants took part in a cross over and randomized design. In one occasion, participants ingested 3 mg/kg/day for 22 consecutive days, while on another occasion they ingested a placebo for 22 days. Three times per week (11 days in total for each 22-day protocol) the velocity and power during the bench press exercise were measured and urine samples were obtained to measure caffeine and paraxanthine concentration. Compared to placebo, caffeine intake produced an increase of mean velocity in bench

press for the first day of ingestion but there was progressive reduction to the ergogenic benefit of caffeine, along with decreased caffeine and paraxanthine concentration in urine and blood pressure with the daily ingestion of caffeine. These data show the existence of a progressive tolerance to the effect of caffeine on neuromuscular performance and urine caffeine concentration when consumed chronically, taking into account that the magnitude of the ergogenic effect was greater on the first day of intake.

In summary, this Doctoral Thesis indicates that caffeine is a substance that, if taken acutely and at a dose of 3 mg/kg, has the capacity to increase neuromuscular performance in velocity-based strength training and in strength-based sports disciplines, such as shot put. In addition, when consumed chronically, caffeine may enlarge some adaptations to strength training, although there is a progressive tolerance to the beneficial effects of this substance when consumed for 22 consecutive days. These data indicate that caffeine is a potent ergogenic agent for strength-based disciplines, although the tolerance to its benefits suggests that caffeine should not be taken daily. Sports scientists and sports nutritionists should decide on the use of caffeine in the sports context taking into account the benefits and disadvantages of this substance when consumed chronically on a daily basis.

A hand holding a brown coffee cup with a black lid. The background features a grid, a line graph with white dots, and a bar chart with teal bars. The overall theme is business and productivity.

3

MARCO TEÓRICO

3.1

MARCO TEÓRICO

Historia de la cafeína y su evolución en la ciencia y en el deporte desde la perspectiva del rendimiento neuromuscular

La cafeína (1,3,7-trimetilxantina, peso molecular 194.2 g/mol) es un alcaloide de la familia metilxantina y una de las "drogas" psicoactivas más consumidas en el mundo¹. A pesar de que no tiene valor nutricional, aproximadamente, el 90% de los adultos consumen cafeína de forma regular^{2,3}, siendo la ingesta media diaria en hombres y mujeres adultos en Estados Unidos de aproximadamente 200 mg⁴. Podemos encontrar cafeína de forma natural en docenas de especies vegetales, como en las hojas de té, los frutos de cacao y café o la yerba mate; aunque también se incluye cafeína artificialmente en suplementos dietéticos y deportivos, medicamentos y cosméticos¹. La cafeína se ingiere con mayor frecuencia en forma de bebidas como el café, los refrescos y el té, aunque el consumo de bebidas energéticas y otros suplementos dietéticos con cafeína ha ido en constante aumento en las dos últimas décadas⁵. Sin embargo, la venta de productos per cápita que contienen cafeína varía en todo el mundo, siendo América del Norte (EE.UU. y Canadá) la que tuvo un promedio más alto con 348 litros consumidos per cápita, seguida de Europa con 200 litros consumidos per cápita⁶. En Europa, Holanda, Finlandia y Suecia consumen el mayor volumen de café⁶.

En el ámbito deportivo, la cafeína se puede ingerir como parte de la dieta habitual (uso social) en las formas descritas anteriormente, pero también con el objetivo de obtener un efecto ergogénico durante el entrenamiento o durante la competición. En la actualidad existe un mercado de suplementos con cafeína específicos para el deporte, como los geles, cápsulas, chicles, enjuagues bucales o los *pre-workout*⁷. Organizaciones

como el Comité Olímpico Internacional (COI)⁸, el Instituto Australiano del Deporte (AIS)⁹ y la Sociedad Internacional de Nutrición Deportiva (ISSN), han producido declaraciones de expertos, en las cuales declararon que la cafeína era una sustancia segura y efectiva en el rendimiento deportivo. Gran parte de la bibliografía científica sobre el estudio de los efectos de la cafeína en el ejercicio se ha centrado en ejercicios de resistencia aeróbica, ya que este es el ámbito en el que los suplementos de cafeína parecen ser más comúnmente utilizados y probablemente beneficiosos en la mayoría de los atletas¹⁰⁻¹². Sin embargo, esta sustancia no siempre ha estado permitida en términos de antidopaje. Como consecuencia de su uso indebido, pero sobre todo por la falta de información sobre las consecuencias para la salud de los deportistas cuando se ingiere en un contexto deportivo, la cafeína estuvo incluida en la lista de sustancias prohibidas de la Comisión Médica del COI desde 1984 y por la Agencia Mundial Antidopaje (AMA) desde 2000 hasta 2004¹³. A pesar de que la AMA decidió retirar la cafeína de la lista de sustancias prohibidas, pidió a los laboratorios de dopaje que siguieran controlando los niveles de esta sustancia en las muestras de orina obtenidas para los controles antidopaje¹⁴. Así, algunos estudios que analizaron las muestras de orina de deportistas tras la competición deportiva¹⁵ observaron que la cafeína estaba presente en una amplia mayoría (~76%) de las muestras de orina de los atletas, siendo los deportistas de disciplinas de resistencia los que mayor concentración de cafeína en orina presentaban frente a los de disciplinas intermitentes como los deportes de equipo. Además, se observó que la concentración de cafeína en orina aumentó significativamente desde 2004 hasta 2015 en determinadas disciplinas como el atletismo, la natación, o el remo¹⁵, indicativo de una creciente ingesta en términos de dosis.

El uso de suplementos con cafeína para mejorar el rendimiento físico en humanos no es un campo de estudio nuevo. Aunque a finales del siglo XIX se llevaron a cabo algunas investigaciones para demostrar los beneficios de la cafeína sobre el rendimiento en laboratorios alemanes¹⁶, podemos suponer que el inicio de la experimentación sobre la ergogenicidad de la cafeína en humanos se fijó a principios del siglo XX. En 1907, Rivers y Webber¹⁷ fueron los primeros investigadores interesados en estudiar los efectos de la cafeína sobre el rendimiento neuromuscular, siendo ellos mismos sus propios sujetos de estudio (n=2). En este estudio pionero, estos científicos realizaron un ensayo con

placebo y un protocolo de cegamiento para intentar aislar el efecto de la cafeína en el rendimiento humano por encima de otras variables de confusión. Estos autores mostraron que una dosis de 300 mg de cafeína aumentó el trabajo en los músculos flexores del segundo dedo de ambas manos, pero este aumento fue de diferente magnitud entre los dos únicos participantes. Este estudio fue el inicio de una gran cantidad de investigaciones posteriores que han permitido profundizar en los conocimientos sobre esta sustancia y sus efectos en el rendimiento neuromuscular.

3.2

Ingesta de cafeína y rendimiento deportivo

La ingesta de cafeína ha demostrado sus efectos ergogénicos en el ámbito deportivo en un amplio abanico de disciplinas deportivas^{10,18-21}. Para dar respuesta a la amplia variedad de pruebas físicas donde la cafeína es ergogénica, se han llevado a cabo varios meta-análisis que examinan los efectos de su ingesta, incluyendo la fuerza máxima en 1 repetición (1 RM)^{22,23}, el índice de desarrollo de la fuerza (RFD)²⁴, la altura de salto vertical^{23,25,26}, el rendimiento de resistencia aeróbica^{12,27-31}, y la resistencia muscular^{22,32-34}. De forma muy visual y través de un infográfico, Baltazar-Martins et al.¹⁹ nos muestra las recomendaciones y el efecto ergogénico de la administración de suplementos de cafeína, teniendo en cuenta las dosis, la modalidad deportiva, los mecanismos de acción, la variación interindividual, la tolerancia y los posibles efectos adversos. Además, respalda los resultados de una recopilación de meta-análisis (*Umbrella-review*)¹⁸ que determinaba que la cafeína es ergogénica en diferentes cualidades del rendimiento físico y que su ingesta tiene un efecto ergogénico pequeño pero significativo en la fuerza muscular y la potencia anaeróbica, junto con tamaños de efecto moderados para la resistencia aeróbica y muscular. Estos datos explican por qué la cafeína es ergogénica en una amplia gama de ejercicios y por qué hay una proporción tan elevada de deportistas que tienen concentraciones moderadas de cafeína en la orina tras competir.

Gran parte de la bibliografía sobre la cafeína en el ejercicio se ha centrado históricamente en el rendimiento aeróbico³⁵. Este interés viene determinado porque es el ámbito en el que los suplementos de cafeína parecen ser más comúnmente utilizados y probablemente por su efecto ergogénico de moderado a grande¹⁰⁻¹². Eso ha

provocado que los deportistas de pruebas de componente aeróbico, como el ciclismo, remo o triatlón sean los que la emplean en mayor medida¹⁵.

Por otro lado, cabe mencionar que buena parte de la literatura sobre la cafeína y el rendimiento deportivo se ha realizado en condiciones de laboratorio, lo que provoca una escasez de estudios para apoyar que estas mejoras se transfieran directamente al rendimiento específico de cada deporte. Afortunadamente, en los últimos años, algunos estudios han minimizado esta carencia realizando estudios de corte ecológico, en distintas disciplinas deportivas, observando sus efectos ergogénicos en distintos deportes, como el fútbol³⁶⁻³⁸, voleibol^{39,40}, rugby^{41,42}, balonmano⁴³, natación⁴⁴, deportes de combate^{45,46} o deportes de raqueta⁴⁷⁻⁴⁹.

A pesar de que la evidencia científica acerca del efecto ergogénico de la ingesta aguda de cafeína tanto en el rendimiento aeróbico como anaeróbico podría ser sólida, más información acerca del efecto de la cafeína en un contexto ecológico o bien el efecto de una ingesta crónica en el rendimiento neuromuscular, podrían proporcionar un mejor entendimiento de los efectos ergogénicos asociados a esta sustancia.

3.3

Mecanismos de acción de la cafeína

Uno de los primeros mecanismos de acción propuestos en relación con el efecto ergogénico de la cafeína sobre el rendimiento en el ejercicio se basaba en el aumento de la concentración de los ácidos grasos libres (AGL) en la sangre, inducidos a su vez por el incremento en la concentración de adrenalina (epinefrina) que se produce tras ingerir cafeína. Según este mecanismo, la mayor disponibilidad de AGL facilitaría una mayor tasa de oxidación de grasas en el músculo para una intensidad de ejercicio dada, acompañado de un ahorro de glucógeno muscular y hepático⁵⁰, lo que podría ser una explicación para la mejora del rendimiento de resistencia aeróbica^{51,52}. Sin embargo, esta hipótesis fue cuestionada y finalmente descartada para explicar el mecanismo principal de la ergogenia de la cafeína, ya que tras varios estudios de rendimiento se ha observado que el consumo de cafeína es beneficioso incluso en protocolos de ejercicio de duración más corta (i.e., < 30 min) y alta intensidad en los que los niveles de glucógeno no parecen ser un factor limitante del rendimiento físico⁵³.

Los mecanismos actualmente más aceptados están relacionados con la capacidad de la cafeína para bloquear los receptores de adenosina A_1 , A_{2A} , A_{2B} y A_3 , impidiendo el efecto fatigante de la adenosina en el sistema nervioso central (SNC). Específicamente, la cafeína tiene una gran afinidad hacia los receptores A_1 y A_{2A} ⁵⁴; además, la cafeína tiene una gran capacidad hidrosoluble que le permite atravesar con facilidad la membrana de varios tejidos, incluyendo la barrera hematoencefálica. De esta manera tras la ingesta de cafeína se produce la distribución de esta sustancia por distintos tejidos, incluyendo el SNC, lo que permite bloquear los receptores de adenosina. El ejercicio intenso produce un incremento de la producción de adenosina, como resultado de la descomposición de adenosín trifosfato (ATP), siendo este es mecanismo de señal de fatiga natural para evitar situaciones de sobre-extenuación. Por tanto, al ingerir

cafeína antes del ejercicio, el bloqueo de los receptores de adenosina que produce esta sustancia impide que la adenosina señale la liberación de glutamato, serotonina, acetilcolina, noradrenalina y dopamina^{55,56}, incrementando así la capacidad de hacer ejercicio por el bloqueo de este mecanismo de señalización de fatiga. Los receptores de adenosina se encuentran en la mayoría de los tejidos, incluidos el cerebro, el corazón, el músculo liso, los adipocitos y el músculo esquelético. La naturaleza ubicua y endógena de la adenosina y la variedad de tipos de receptores facilitan que la cafeína pueda afectar simultáneamente a diversos tejidos en función de los receptores estimulados, lo que da lugar a una amplia gama de respuestas que a menudo interactúan entre sí⁵³. De esta forma, la cafeína ejerce efectos sobre el SNC y altera la excitación, lo que puede conducir a mejoras en el rendimiento físico y cognitivo⁵⁷. En el campo del rendimiento físico, estas mejoras están relacionadas con la reducción del índice de esfuerzo percibido (RPE)^{12,58,59}, aumento de la saturación de oxígeno muscular⁶⁰, el dolor muscular^{59,61} y, posiblemente, la capacidad del músculo esquelético para generar fuerza^{58,59}.

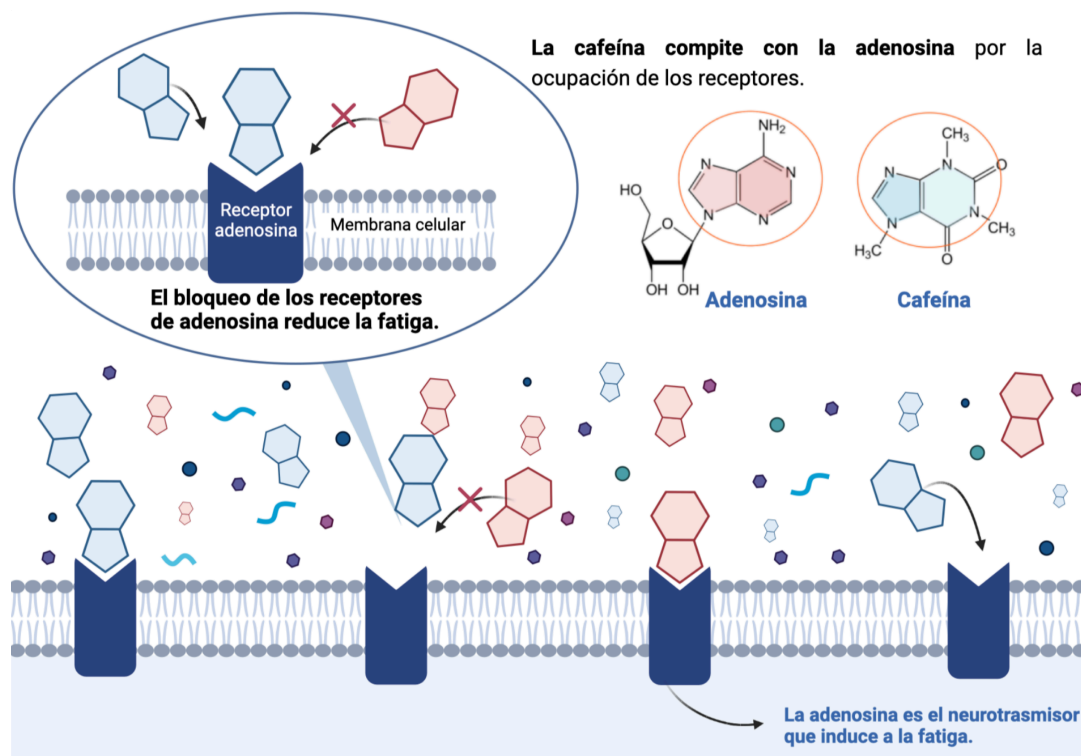


Figura 1. Moléculas de cafeína bloqueando los receptores de adenosina en el cerebro (elaboración propia).

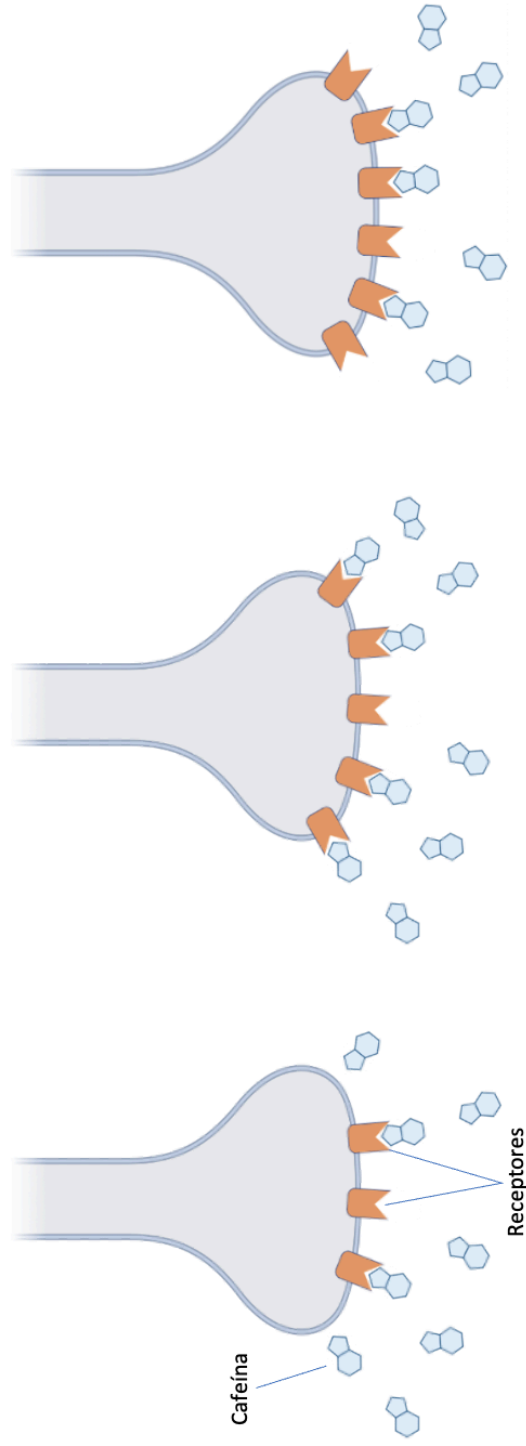
Además de su efecto central, la cafeína podría tener algunos efectos directos sobre el músculo esquelético que pueden contribuir a su ergogenicidad. Los primeros estudios sobre el efecto de la cafeína en el rendimiento neuromuscular planteaban la hipótesis de que el efecto ergogénico de la cafeína podía atribuirse (al menos en parte) a factores periféricos mediante el aumento de la liberación de iones de calcio del retículo sarcoplásmico y el aumento de la contractilidad neuromuscular^{62,63}. En la actualidad, se ha sugerido que, para obtener tal efecto dentro del músculo, se necesitarían dosis de cafeína que serían tóxicas para el ser humano⁶⁴. Así, el estudio sobre el principal mecanismo de acción asociado a la ergogenicidad de la cafeína durante el ejercicio se ha desplazado de local (dentro del músculo) a central (en el SNC). Dado que la adenosina es un subproducto de diferentes vías metabólicas, existen otros mecanismos relacionados con el rendimiento neuromuscular donde parece que la ingesta de cafeína puede aumentar la liberación de adrenalina, mejorar la función de la bomba de Na⁺/K⁺ y aumentar el reclutamiento de unidades motoras⁶⁵⁻⁶⁷, lo que puede dar lugar a una conducción neuromuscular más rápida⁶⁶. Por lo tanto, parece que la ingesta aguda de cafeína produce una estimulación del SNC que facilita el reclutamiento de las fibras musculares durante las contracciones musculares máximas y submáximas⁵³.

Por otro lado, pese a la abundante literatura científica sobre los efectos de la cafeína en el organismo, todavía existe una carencia de información sobre la incidencia de esta cuando se consume de forma crónica ya que puede existir una tolerancia progresiva a sus efectos fisiológicos debido a su consumo diario. Desde el punto de vista fisiológico, generalmente los tejidos responden a la sobreestimulación o subestimulación hormonal con un aumento o disminución, respectivamente, del número de receptores pertinentes. Es decir, una "regulación al alza" o una "regulación a la baja" de los receptores⁶⁸.

El estudio sobre los mecanismos y la tolerancia a la ingesta crónica de cafeína se estudió por primera vez en roedores en 1982^{69,70}. Estas investigaciones mostraron que la ingesta crónica de cafeína producía un aumento del número de receptores para la adenosina. Es decir, como parte de los receptores A_1 fisiológicamente presentes en el SNC de los roedores habían sido bloqueados de manera crónica por la cafeína, el tejido respondía

con la síntesis de nuevos receptores para compensar el bloqueo por cafeína. En 1989, el grupo de Sfiles⁷¹ aportó más información sobre el mecanismo de la tolerancia a la cafeína, y descubrió que la ingesta crónica de esta sustancia no sólo aumentaba el número de receptores de A_1 , sino también el acoplamiento al receptor de la proteína G (perteneciente a la familia de los receptores de adenosina). Sin embargo, para una mayor comprensión sobre los efectos que tiene la ingesta de cafeína en el rendimiento deportivo, es necesario incrementar la investigación científica sobre qué mecanismos de acción están implicados en la ergogenicidad de la cafeína y su tolerancia.

Sobreestimulación de los receptores



Las neuronas de los no consumidores de cafeína presentan un número normal de receptores de adenosina. Por lo tanto, una dosis moderada de cafeína tiene una alta capacidad para bloquear una gran proporción de estos receptores.

Con la ingesta crónica de cafeína, el número de receptores de adenosina aumenta y la misma dosis moderada de cafeína tiene menos efecto en las personas que consumen cafeína a diario, ya que la proporción de receptores bloqueados disminuye.

Este mecanismo de tolerancia al efecto de la cafeína hace que los consumidores de cafeína tengan que tomar dosis mayores para experimentar efectos de esta sustancia.

Figura 2. Ilustración propia sobre la sobreestimulación de los receptores de adenosina.

3.4

Metabolismo de la cafeína

La cafeína es un alcaloide con más de 25 metabolitos identificados⁷² que se metaboliza principalmente en el hígado, casi exclusivamente por el citocromo p450. El metabolismo de la cafeína produce tres dimetilxantinas, la paraxantina (85%), teobromina (10%) y teofilina (5%)⁷³; éstas, a su vez, pueden mediar algunos de los efectos potenciadores del rendimiento de la cafeína ya que tienen una actividad farmacológica comparable a la cafeína⁵³. La cafeína aparece en el torrente sanguíneo tan pronto como 15 minutos después de la ingesta, alcanzando su máximo tras unos 60 minutos, con una vida media de 4 y 6 horas, pudiendo variar entre individuos⁷⁴. Estos tiempos pueden variar según la forma en la que se ingiere la cafeína, de tal manera que el uso de chicles de cafeína podría incrementar la aparición de la cafeína en sangre frente al uso de cápsulas⁷⁵. Parece que los deportistas que consumen cafeína antes de la competición en dosis moderadas y con el objetivo de incrementar el rendimiento presentan mayoritariamente unas concentraciones entre 2 y 4 µg/mL de cafeína en orina¹⁵. Como se ha comentado, la AMA decidió retirar la cafeína de la lista de sustancias prohibidas con efecto a partir del 1 de enero de 2004. Sin embargo, ésta controla la proporción de muestras de orina con una concentración de cafeína superior a 6 µg/mL con el fin de vigilar el uso de dosis elevadas que podrían ser perjudiciales para los deportistas¹³. La cantidad de cafeína que se excreta intacta en la orina es una pequeña cantidad (entre 3-5%) del total de cafeína ingerida^{76,77}, por lo que medir la concentración de cafeína en orina podría ser un método inexacto para determinar el consumo de cafeína de un individuo. Los niveles urinarios de cafeína están determinados por una variedad de factores, incluyendo el tamaño de la dosis de cafeína, el aclaramiento metabólico de la cafeína y el momento de la muestra de orina en relación con el momento de la ingesta de cafeína⁷⁸. Sin embargo, la mayor parte de la bibliografía acerca de la concentración

de cafeína en orina respecto de la dosis y de las características de los individuos se ha llevado a cabo generalmente con un consumo agudo de la sustancia, lo que podría ser uno de los motivos de su variabilidad. Además, la medición de la concentración de paraxantina en orina podría ser un marcador más específico de la dosis ingerida ya que la mayor parte de la cafeína se excreta en forma de paraxantina¹. Por lo tanto, podría ser necesario investigar el curso temporal de la concentración de cafeína y paraxantina en orina cuando esta se consume diariamente.

3.5

Protocolos de suplementación de la cafeína: fuentes, dosis y *timing*

Tal y como hemos comentado anteriormente, la cafeína se puede obtener de fuentes naturales, como el café, el té, la yerba mate y/o el cacao, pero también se añade a muchos alimentos, bebidas y productos dietéticos (suplementos deportivos, chicles, caramelos, etc.), tanto en forma artificial (e.g., en polvo) como de forma natural (e.g., guaraná, nuez de cola)⁷ (Tabla 1). Además, la cafeína está presente en varios fármacos de venta libre y con receta en combinación con otros fármacos analgésicos y diuréticos para potenciar su efecto farmacológico⁷⁹. De hecho, la facilidad en muchos países para acceder a diferentes alimentos, medicamentos, suplementos, o bebidas que contienen cafeína incrementa las oportunidades de consumo de esta sustancia, lo que también contribuye a explicar las altas tasas de consumo en la población en general y en la población de deportistas.

Tabla 1. Contenido de cafeína en diferentes alimentos, bebidas y preparados disponibles comercialmente.

Alimentos o bebidas	Ración	Cafeína (mg)	Alimentos o bebidas	Ración	Cafeína (mg)
Café instantáneo	250 mL	60	Bebida energética: Lift Plus	250 mL	36
Café preparado	250 mL	80	Bebida energética: Lipovitan	250 mL	50
Café solo corto o espresso	1 ración	107	Bebida energética: Black Stallion	250 mL	80
Café preparado Starbucks	600 mL	415	Bebida energética: AMP Energy	500 mL	143
Café helado	500 mL	30-200	Bebida energética: Spike Shotgun	500 mL	350
Frappuccino	375 mL	90	Bebida energética: Fixx	600 mL	500
Té	250 mL	27	Chupito energético: Ammo	30 g	170
Té helado	600 mL	20-40	Chupito energético: Jolt	60 g	150
Chocolate caliente	250 mL	5-10	Gel deportivo con cafeína: PowerBar	40 g	25
Chocolate con leche	60 g	5-15	Gel deportivo con cafeína doble: PowerBar	40 g	50
Chocolate negro	60 g	10-50	Gel deportivo con cafeína: GU	32 g	20
Barra de chocolate	60 g	58	Gel deportivo con cafeína: Carboshotz	50 g	80
Refresco: Coca-Cola	375 mL	49	Gel deportivo: PB Speed	35 g	40
Refresco: Pepsi cola	375 mL	40	Barrita: PowerBar Acticaf Performance	65 g	50
Refresco: Jolt	375 mL	75	Chicle con cafeína: Jolt	1 barrita	33
Bebida energética: Red Bull	250 mL	80	No-Doz (Australia)	1 tableta	100
Bebida energética: Red Eye Power	250 mL	50	No-Doz (EE. UU.)	1 tableta	200
Bebida energética: V Energy	250 mL	50	Excedrin extra fuerte	1 tableta	65
Smart Drink	250 mL	80			

Tabla adaptada del estudio de Burke 2008⁷⁸.

Si solo nos referimos al consumo en forma de bebida, hace una década se señalaba que en torno al 96% del mismo procede del café, los refrescos y el té⁸⁰, si bien actualmente el uso de bebidas energéticas se está incrementando⁸¹, especialmente en el ámbito deportivo.

A pesar de la variedad, la investigación se ha centrado en administrar la cafeína en forma de cápsulas o en forma de polvo mezclado con algún líquido, para simplificar la estandarización de la dosis y la creación de placebos. Además, parece que tanto la cafeína en estado anhidra (cápsula/tableta, polvo) como en café, tienen la misma magnitud de efecto ergogénico siempre y cuando se consiga igualar la dosis⁸², mientras que la elección sería una cuestión de preferencia personal y de estandarización⁸³. En la actualidad, existe un interés por investigar los efectos de la ingesta de cafeína en formas alternativas, como chicles, barritas, geles, enjuagues bucales, bebidas energéticas y aerosoles⁸⁰. En 2018, Wickham y Spriet⁸⁴ publicaron una revisión sobre las alternativas

que hay relativas al uso de la cafeína en el ejercicio. A modo de resumen, en esta revisión se informa que el chicle con cafeína se absorbe más rápidamente a través de la mucosa bucal en comparación con la administración en cápsulas, aunque la absorción total de cafeína es igual a lo largo del tiempo. Asimismo, tanto los aerosoles bucales como los nasales con cafeína pueden estimular los nervios con conexiones cerebrales directas y entrar en la sangre a través de la absorción mucosa y pulmonar, aunque todavía existe poca literatura científica que respalde la administración de cafeína de esta manera. Otra reciente investigación⁸⁵, comparó la dosis respuesta de los enjuagues bucales en el rendimiento neuromuscular, en la que se observó que las dosis más altas de cafeína aumentaron la resistencia muscular en el ejercicio de *press banca*, pero la fuerza de una repetición máxima (1RM) no pareció depender de la dosis. Estas nuevas fuentes de cafeína son muy interesantes, ya que su rápida absorción en comparación con las fuentes convencionales puede ser importante en muchas situaciones deportivas. Sin embargo, faltan más investigaciones que examinen su efecto en el rendimiento y en diferentes contextos deportivos. De esta manera, y desde un punto de vista conservador, podemos señalar el efecto ergogénico de la cafeína cuando se consume en forma de cápsula o en bebidas, pero se requiere más información para asegurar un mismo nivel de ergogenia cuando se utilizan aerosoles o el enjuague bucal con productos que contienen cafeína.

En cuanto a la dosis de cafeína, la ingesta de la misma puede ser ergogénica en una amplia gama de actividades de ejercicio y la dosis "óptima" sigue siendo difícil de determinar. Sin embargo, una *umbrella-review*¹⁸ señalaba que las dosis óptimas pueden variar en función de la fuente de cafeína, la duración de la prueba y el tipo de acción neuromuscular, así como existir diferencias entre individuos, lo que debe tenerse en cuenta a la hora de consumir suplementos con cafeína. No obstante, se suele sugerir que los efectos "óptimos" de la cafeína se obtienen al consumir dosis moderadas, de 3 a 6 mg/kg¹⁸. Los estudios que analizaron la dosis respuesta⁸⁶⁻⁸⁹, muestran que dosis moderadas de cafeína (~3 mg/kg) parecen ser igual de ergogénicas en el rendimiento neuromuscular en comparación con dosis mayores (e.g., 6 mg/kg). Cuando se compararon dosis más altas (9 y 11 mg/kg)⁹⁰, tampoco hubo diferencias en la ergogenicidad de la cafeína, pero estas dosis parecen poco apropiadas ya que se asocian

a una alta incidencia de efectos secundarios⁹¹. Si hablamos de cuál es la dosis mínima efectiva en términos ergogénicos, parece que una dosis en torno a 3 mg/kg fue ergogénica en ejercicios de resistencia neuromuscular⁹², mientras que dosis de 1 mg/kg no han mostrado efectos positivos⁹³. Por lo tanto, el consumo de dosis moderadas de 3 mg/kg de cafeína parecen ser suficientes para tener efectos ergogénicos en el rendimiento y tener menores efectos secundarios.

Por último, el *timing* adecuado para potenciar los efectos ergogénicos de la cafeína parece ser diferente en función de la fuente consumida.^{74,76,77} En el caso de las cápsulas y de las bebidas con cafeína, el momento óptimo de ingesta se encuentra entre los 45 a 60 minutos antes del ejercicio, ya que los niveles plasmáticos de cafeína alcanzan valores máximos en ese tiempo⁵³. Sin embargo, tanto los chicles como los geles con cafeína pueden mejorar el rendimiento en ejercicios de resistencia incluso si se consumen 10 minutos antes del ejercicio⁹⁴. Además de las fuentes mencionadas, los aerosoles nasales y bucales con cafeína administrados directamente en la boca, pueden afectar al cerebro más rápidamente debido a que estimula los nervios que tienen enlaces directos con el cerebro⁸⁴. Sin embargo, hasta la fecha sólo existen unos pocos estudios que respalden esta afirmación^{95,96}. Estas novedosas fuentes parecen producir un perfil farmacocinético de cafeína comparable a la administración de una bebida con cafeína⁹⁷. En la *Figura 3* se muestra una ilustración sobre las fuentes de cafeína, las dosis y el *timing*.

Protocolos de suplementación de la cafeína: fuentes, dosis y timing

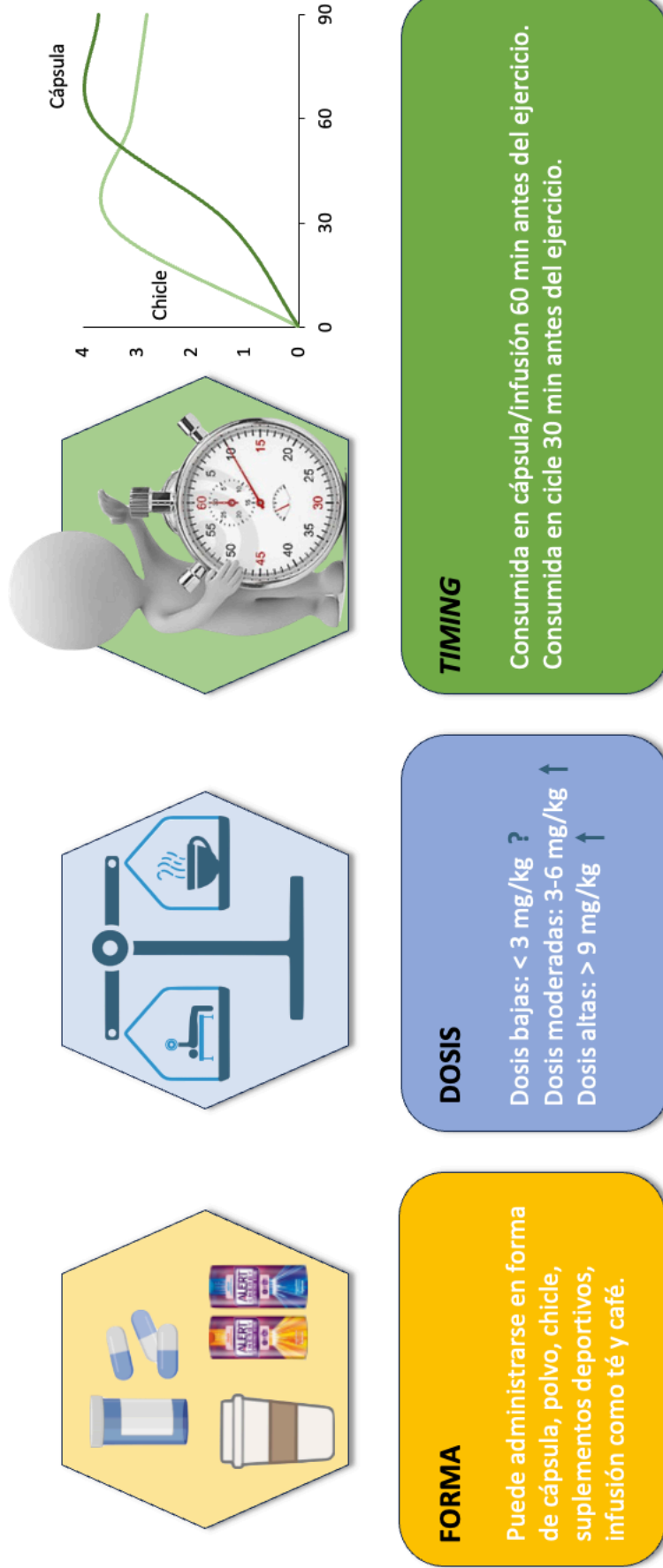


Figura 3. Ilustración propia sobre la ingesta de cafeína y su forma, dosis y timing.

3.6

Ingesta de cafeína y rendimiento neuromuscular

Mientras que las primeras revisiones sobre cafeína y rendimiento físico confirmaron el efecto ergogénico de esta sustancia en actividades de ejercicio basadas en el metabolismo aeróbico^{62,63}, el beneficio potencial de la suplementación con cafeína sobre la fuerza neuromuscular se rechazó durante muchos años^{62,63,98}. Sorprendentemente, la primera investigación que estudió la ergogenicidad de la cafeína analizó su efecto en el rendimiento neuromuscular¹⁷, tal y como se explicó anteriormente (apartado: Historia de la cafeína y su evolución). Posteriormente, Hyde y Root en 1917⁹⁹ analizaron a dos hombres sanos que, tras ingerir cafeína, realizaron más del doble de trabajo en los músculos flexores del segundo dedo de la mano derecha en un ergógrafo. En 1939, Thornton et al.¹⁰⁰ informaron de un aumento del rendimiento en el tiempo de reacción, la fuerza de prensión de la mano y la prensión de la mano mantenida con una dosis de 300 mg de cafeína en comparación con un placebo (n = 3). A pesar de estas investigaciones, la escasez de estudios, especialmente *in vivo*, el pequeño tamaño de las muestras y los diferentes tipos y dosis de cafeína utilizados, dificultaron el establecimiento de conclusiones sólidas durante la década de 1980^{62,63,98}. En aquel momento, la mayoría de los estudios habían comprobado las propiedades de la cafeína *in vitro* utilizando tejidos musculares de animales^{62,63,101-104}. Estos estudios *in vitro* informaron de los efectos de la cafeína sobre la contracción muscular. Sin embargo, las revisiones sistemáticas sostenían que era posible que los aumentos de la contractilidad neuromuscular inducidos por su ingesta no se tradujeran en una mejora de la fuerza *in vivo*⁹⁸.

El estatus de la cafeína como sustancia con un potencial efecto ergogénico para el rendimiento neuromuscular empezó a cambiar a principios siglo XXI. Durante la primera

década, varias revisiones sistemáticas señalaron diversos beneficios de la ingesta aguda de cafeína sobre el rendimiento anaeróbico, incluida la fuerza, aunque los autores seguían sugiriendo que la escasez y los resultados contradictorios de los estudios hasta esa fecha impedían una categorización clara de la cafeína como ayuda ergogénica para el rendimiento de fuerza^{53,57,78}. Por ejemplo, los estudios que examinaron su efecto sobre el par máximo isocinético, la fuerza máxima isométrica, la resistencia neuromuscular para la musculatura del tren superior y el peso máximo de la 1RM mostraron resultados equívocos, y la cafeína tuvo un efecto ergogénico mínimo dentro de estas áreas⁵⁷. Por aquel entonces, algunos estudios sugirieron que la cafeína podría aumentar la contractilidad a través de acciones locales en el propio músculo esquelético, continuando así con la opinión de las décadas anteriores^{53,57,78,105}.

La falta de consistencia en los resultados sobre el efecto de la cafeína sobre el rendimiento neuromuscular llega incluso a los meta-análisis publicados en los últimos 10 años, donde se observan resultados contradictorios a pesar de analizar la misma variable. Por ejemplo, Gonçalves Ribeiro et al.,²⁷ no observaron efectos significativos de la ingesta de cafeína sobre la potencia muscular, mientras que un meta-análisis posterior de Grgic¹⁰⁶ sí mostraba efectos ergogénicos de la cafeína en esta misma variable. Posteriormente, una *umbrella-review*¹⁸ determinó que la ingesta aguda de cafeína (habitualmente de 3 a 6 mg/kg) tiene un efecto ergogénico sobre la fuerza muscular, la resistencia neuromuscular, la altura de salto, la potencia anaeróbica y la resistencia aeróbica. A pesar de que esta *umbrella-review* nos proporciona información clara sobre los efectos de la cafeína, tan solo 4 de los 11 meta-análisis incluidos habían analizado los efectos de la cafeína en ejercicios propiamente de fuerza^{22,23,34,107}. Posteriormente, una nueva revisión sistemática²¹ analizó los últimos estudios (n=47) que analizaban específicamente ejercicios de fuerza. Esta revisión concluyó que existen pruebas sólidas que apoyan que la ingesta aguda de cafeína es ergogénica sobre la 1RM, la fuerza máxima isométrica e isocinética; y la resistencia neuromuscular, la velocidad y la potencia en diferentes ejercicios de fuerza, cargas y protocolos de series. Además, parece que la suplementación con cafeína puede mejorar las adaptaciones al entrenamiento de resistencia, como el aumento de la fuerza y la potencia²¹.

Por tanto, el conocimiento sobre la ergogenicidad de la cafeína en el ejercicio y el deporte ha recorrido un largo camino hasta llegar a donde está hoy. Muchos factores potenciales podrían ser responsables del sinuoso camino recorrido en esta área de investigación. Las diferencias en los diseños de los estudios, como las características de los participantes (edad, sexo, estado de entrenamiento, consumo habitual de cafeína), el tamaño de la muestra, la dosis, el momento de la ingesta, la forma de administración o el cegamiento de la ingesta, entre otros, probablemente hayan propiciado la evolución de la evidencia sobre los efectos ergogénicos de la cafeína en el rendimiento de fuerza en las últimas décadas.

Efectos de la cafeína en la 1RM

Tal y como se ha mencionado anteriormente, se ha observado que la cafeína puede mejorar el rendimiento en actividades de alta intensidad y corta duración. No obstante, históricamente siempre ha existido controversia sobre el efecto potencial de la cafeína en la 1RM. En 2008, dos estudios^{108,109} analizaron los efectos de la cafeína en la fuerza dinámica máxima (i.e., 1RM). Los autores no informaron de ningún efecto significativo de la ingesta de cafeína sobre la mejora de la fuerza en un grupo de hombres entrenados. Por estos mismos años, Goldstein et al.¹¹⁰ informaron de un aumento significativo de la fuerza en el *press banca* tras la ingestión de cafeína. Sin embargo, en 2016, Polito et al.²² realizaron un meta-análisis, en el que no encontraron ningún efecto significativo de la ingesta de cafeína sobre el rendimiento en la 1RM. Sin embargo, sólo tres estudios cumplían los criterios de inclusión. El número total de participantes fue relativamente bajo (n = 46), lo que podría indicar problemas con la potencia estadística. Hasta esa fecha, los resultados inconsistentes de los estudios impedían sacar conclusiones sólidas sobre el potencial ergogénico de la cafeína para los resultados de fuerza dinámica máxima.

En la actualidad, una *umbrella-review*¹⁸ concluyó que la ingesta de cafeína probablemente tiene un efecto ergogénico sobre la 1RM. Varios estudios recientes^{89,90,111,112} evaluaron estos efectos ergogénicos. En un estudio que analizó los

efectos de la cafeína en la 1RM en el ejercicio de *press banca* y en el de sentadilla⁸⁸, se encontró un efecto ergogénico de la cafeína en ambos ejercicios, aunque el tamaño del efecto (ES; diferencia de medias estandarizada) fue pequeño (ES: 0.07-0.15). Estos hallazgos fueron confirmados por otros tres estudios^{89,90,111,112} que también informaron de un efecto ergogénico de la cafeína sobre la fuerza en la 1RM de la sentadilla (ES: 0.27) y del *press* de banca (ES: 0.11-0.45). De todos los nuevos estudios que exploraron los efectos de la cafeína sobre la fuerza medida en la 1RM, sólo uno¹¹³ no encontró una diferencia significativa entre la cafeína y el placebo. Aun así, debe considerarse que incluso en este estudio, los promedios de la 1RM favorecieron a la cafeína. Un dato para tener en cuenta es que no individualizaron la ingesta de ya que administraron una dosis absoluta de 300 mg.

La bibliografía actual indica que la ingesta de cafeína puede tener efectos positivos en el rendimiento de la 1RM tanto en el tren superior como en el tren inferior. Sin embargo, los efectos tienden a ser pequeños y probablemente tengan la mayor relevancia práctica para los atletas que compiten en deportes basados en la fuerza máxima.

Efectos de la cafeína sobre la fuerza isométrica

La cafeína puede tener efectos en la fuerza isométrica, que se refiere a la capacidad de generar fuerza en una contracción muscular estática, sin cambios en la longitud del músculo. Varios estudios han investigado el efecto de la ingesta de cafeína en la fuerza isométrica y han encontrado resultados mixtos. En un meta-análisis de Warren et al.³⁴ se analizaron los resultados de 27 estudios que exploraron los efectos de la cafeína sobre producción de fuerza máxima, incluidas las pruebas de la 1RM, isocinéticas e isométricas. Los autores concluyeron que la cafeína produjo una mejora sobre la producción de fuerza máxima en todas sus pruebas, tanto dinámica como isométrica.

Varios estudios también han explorado los efectos de la cafeína sobre la fuerza en el test de dinamometría manual, pero los resultados son equívocos^{18,40,43,49,114-124}. Las discrepancias entre los estudios podrían deberse a las diferencias en la dosis de cafeína. A pesar de ello, un reciente meta-análisis¹²⁵ indica que la ingesta de cafeína aumenta de

forma aguda la fuerza isométrica en test de dinamometría manual. En esta revisión, se observó un efecto ergogénico de la cafeína cuando se consumieron dosis de 1-3 mg/kg o 5-7 mg/kg, y el tamaño del efecto de la cafeína fue similar cuando se consumió en estos rangos de dosis.

Es importante destacar que los resultados obtenidos utilizando acciones musculares isométricas no deben generalizarse necesariamente a las acciones musculares dinámicas¹²⁶. Además, la cafeína puede tener efectos en otros aspectos del rendimiento, como la velocidad de contracción y la coordinación muscular. Estos factores también pueden influir en el rendimiento neuromuscular isométrico y variar entre individuos.

Efectos de la cafeína sobre la resistencia muscular

La resistencia muscular es un componente importante de los programas de entrenamiento tanto para la salud como para el deporte de competición. La resistencia muscular evalúa la capacidad del músculo para resistir la fatiga y es una cualidad importante en muchas disciplinas deportivas. La resistencia muscular puede evaluarse con repeticiones de sentadillas, flexiones de brazos, o *press* de banca, entre otros, hasta el fallo muscular momentáneo, o mediante ejercicios isométricos sostenidos en el tiempo¹²⁷.

La cafeína demostró ser ergogénica para la resistencia muscular en dos meta-análisis^{22,34} que informaron de tamaños del efecto que oscilaban entre 0.28 y 0.38 (6-7%). Un análisis de meta-regresión³⁴ mostró que por cada aumento de 1 mg/kg en la dosis de cafeína el tamaño del efecto para la resistencia muscular aumentaba en 0.1. Mientras que en el otro meta-análisis²², ninguno de los estudios incluidos en la revisión examinó la relación dosis-respuesta. Un meta-análisis reciente¹²⁸ exploró los efectos de la cafeína sobre la resistencia muscular en el *press* de banca y el *press* de piernas. Para el *press* de banca, la ingesta de cafeína mejoró el rendimiento de resistencia muscular en una repetición adicional, mientras que para el *press* de piernas no había diferencias significativas con el placebo. Estos resultados deben interpretarse con cautela, dado que hubo una gran heterogeneidad en las cargas utilizadas para la prueba de resistencia

muscular entre los estudios incluidos (e.g., 30% 1RM¹²⁹ y 80% 1RM¹⁰⁹). En este contexto, debe tenerse en cuenta que una mejora de una repetición es mucho menos importante para generar adaptaciones neuromusculares cuando se realiza una serie hasta el fallo con el 30% 1RM en comparación con la realización de una serie con el 80% 1RM. Además, es posible que evaluar únicamente el número de repeticiones realizadas puede considerarse una medida inadecuada para evaluar la resistencia neuromuscular. Debido a esto, estudios recientes también han cuantificado el volumen del ejercicio utilizando el tiempo bajo tensión⁸⁹ (i.e., la suma del tiempo empleado en las fases concéntrica y excéntrica) y otros estudios también han analizado la calidad de cada repetición¹³⁰ (i.e., la velocidad y la potencia de cada repetición). Esta área de investigación es muy relevante desde una perspectiva ecológica, dado que, para algunas adaptaciones, la calidad de las repeticiones realizadas es probablemente más importante que la cantidad.

En general, las pruebas actuales sugieren que la ingestión de cafeína es ergogénica para la resistencia muscular y que estos efectos son consistentes en diferentes ejercicios de resistencia, cargas y protocolos de series (i.e., series únicas o múltiples).

Efectos de la cafeína en la velocidad y potencia de la barra

En el entrenamiento de fuerza y de potencia, uno de los objetivos principales es desplazar la curva fuerza-velocidad hacia “la derecha”, lo que indica la capacidad del deportista para levantar cargas mayores a velocidades más altas¹³¹. El número de estudios que exploran los efectos de la cafeína sobre la velocidad y la potencia en el ejercicio de resistencia ha aumentado linealmente en los últimos años.

En 2012, Mora-Rodríguez et al.¹³² publicaron uno de los primeros estudios sobre el efecto de una ingesta aguda de cafeína sobre la velocidad de desplazamiento de la barra en los ejercicios de *press banca* y sentadilla utilizando cargas submáximas. Los resultados mostraron que la velocidad de desplazamiento aumentó con todas las cargas con la ingestión de cafeína, excepto para la velocidad de *press de banca* a cargas que

provocan un desplazamiento de la barra de 1 m/s. Utilizando la misma dosis de cafeína (3mg/kg) en un grupo de 14 atletas brasileños de jiu-jitsu, Diaz-Lara et al.¹³³ confirmaron que la cafeína puede ser ergogénica, mostrando un aumento de la potencia media y máxima y de la velocidad máxima en el ejercicio de *press* de banca. En otro estudio de dosis-respuesta⁹¹ trataron de investigar la velocidad de contracción a tres dosis diferentes de cafeína (3, 6 y 9 mg/kg) y a través de cuatro esquemas de carga diferentes, 25%, 50%, 75% y 90% 1RM en los ejercicios de *press* de banca y sentadilla. Según este estudio, la dosis de 3 mg/kg fue suficiente para mejorar las acciones musculares de alta velocidad frente a cargas bajas, mientras que una dosis más alta de cafeína (9 mg/kg) era necesaria frente a cargas elevadas. Sin embargo, cabe destacar que la ingesta de 9 mg/kg aumentó drásticamente la frecuencia de los efectos secundarios.

Otros estudios informaron de los efectos positivos de la cafeína sobre la velocidad y la potencia en cargas variables (i.e., 30%, 50%, 75%, 80% y 90% 1RM), tanto en el ejercicio de *press* de banca, como en el de sentadilla^{86,134-136}. Siguiendo esta línea, un meta-análisis de 12 estudios¹³⁷, también exploró los efectos de la cafeína sobre la velocidad de desplazamiento de la barra en el ejercicio de resistencia muscular. Este meta-análisis incluyó 12 estudios y analizó los efectos de la cafeína sobre la velocidad media y máxima en ejercicios de la parte inferior del cuerpo frente a los de la parte superior a diferentes cargas (bajas, medias y altas). La ingesta de cafeína tuvo un efecto ergogénico significativo y un tamaño del efecto de moderado a grande (ES: 0.41-0.82) sobre la velocidad media y máxima en todas las cargas y esto ocurrió tanto en los ejercicios de la parte superior como en los de la parte inferior del cuerpo.

En general, sobre la base de la investigación actual, parece que la cafeína tiene un efecto ergogénico considerable sobre la velocidad y la potencia en el ejercicio de fuerza. Dadas algunas de las pruebas contradictorias presentadas para la fuerza máxima, esto podría indicar que la cafeína tiene un efecto más pronunciado sobre la velocidad de contracción que sobre la producción de fuerza máxima y la resistencia muscular^{22,23,137}.

3.7

Ingesta crónica de cafeína y su posible tolerancia

Si bien la evidencia actual apunta hacia un efecto ergogénico de la cafeína en el rendimiento neuromuscular cuando se toma de forma aguda^{18,23,107}, se sabe poco sobre la existencia de tolerancia al efecto ergogénico de la cafeína en el rendimiento neuromuscular cuando la sustancia se ingiere de forma crónica.

En humanos, Beaumont et al.¹³⁸ publicaron un estudio en el que se comparaba a un grupo con ingesta crónica de cafeína (1.5 a 3 mg/kg/día) con otro grupo con ingesta de placebo durante 28 días. En dicho estudio, el efecto de la cafeína antes de iniciar el protocolo de ingesta crónica, y también después de finalizarlo, para determinar si los efectos potenciales de la cafeína disminuían tras la ingesta crónica. En esta investigación se analizó el trabajo producido en un cicloergómetro en pruebas aeróbicas. Estos autores encontraron que el grupo suplementado con cafeína de manera crónica disminuyó el efecto ergogénico de la cafeína en la comparación pre-post, mientras que el grupo con placebo mantuvo el efecto de la cafeína. Esta investigación fue pionera ya que utilizó la ingesta crónica prolongada de cafeína en humanos con habituación estandarizada, pero no tuvo en cuenta el posible efecto del entrenamiento. Además, esta investigación implicó dos grupos experimentales, por lo que las variaciones de las respuestas individuales a la cafeína también pudieron afectar a los resultados del experimento. Recientemente, Lara et al.¹³⁹ investigaron el curso temporal de la tolerancia a los efectos ergogénicos de una dosis de 3 mg/kg/día de cafeína durante 20 días consecutivos, testando en 9 ocasiones por sustancia al mismo grupo de participantes. Este estudio informó que la ingesta de cafeína aumentaba el rendimiento en la prueba de Wingate de 15 segundos y en un ejercicio incremental en cicloergómetro durante los primeros 15-18 días, aunque se producía una tolerancia progresiva al efecto

ergogénico de la cafeína, visible en los últimos días de suplementación. Sin embargo, estas investigaciones sólo analizaron variables de resistencia aeróbica (e.g. prueba de contrarreloj) y anaeróbica (e.g. prueba de Wingate). Hasta la fecha, ninguna investigación previa ha determinado los efectos de la ingesta diaria de cafeína sobre la tolerancia en el rendimiento neuromuscular.

Curiosamente, según la concentración de cafeína encontrada en muestras obtenidas con fines de análisis de dopaje, los atletas de deportes de fuerza como la halterofilia se encuentran entre los deportistas con mayores concentraciones de cafeína en orina¹⁵. Así pues, dado el elevado consumo de cafeína y la hipótesis de que la ingesta diaria puede influir en los beneficios para el rendimiento, es necesario ampliar la información existente sobre la tolerancia y los potenciales efectos ergogénicos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular.

3.8

Efectos secundarios de la ingesta de cafeína

A pesar de que la literatura referente a la ingesta de la cafeína muestra que es ergogénica para un amplio espectro de tipos de ejercicio y deportes, su uso podría no ser apropiado para todos los atletas. Como ocurre con cualquier suplemento, la ingesta de cafeína, tanto aguda como crónica, también se asocia a ciertos efectos secundarios. La cafeína es un potente estimulante del sistema nervioso central y se utiliza principalmente para aumentar el vigor y la actividad, evitar la somnolencia y restablecer el estado de alerta¹⁴⁰. Esta ingesta se ha asociado con beneficios adicionales sobre el estado de salud, como la disminución del riesgo de varios cánceres, las enfermedades cardiovasculares, la enfermedad de Parkinson y la diabetes de tipo 2¹⁴¹. Sin embargo, también presenta ciertos efectos adversos. Los más comunes reportados en la literatura son el aumento de la ansiedad, insomnio, molestias gastrointestinales y aumento de la presión arterial en reposo^{81,142}. La magnitud y duración de estos inconvenientes dependen de la dosis^{91,143} que parece aumentar gradualmente. Se ha observado que la ingesta moderada de cafeína (3 mg/kg) mejoró la percepción subjetiva de la potencia neuromuscular durante el ejercicio y redujo la fatiga general a la mañana siguiente de la ingesta. Sin embargo, también aumentó la prevalencia de efectos secundarios como insomnio (31%), activación (17%) y nerviosismo (13%) con respecto a la ingesta de placebo¹⁴⁰. En un estudio que compara diferentes dosis⁹¹, se ha observado que la ingesta aguda de cafeína a una dosis de 9 mg/kg aumenta drásticamente la frecuencia de efectos secundarios adversos en comparación con la ingesta de una dosis de 3 o 6 mg/kg. Especialmente, el insomnio (54%), el aumento de la diuresis (54%) y los problemas gastrointestinales (38%)⁹¹. Curiosamente, los efectos adversos asociados a la ingesta crónica de cafeína en dosis moderadas (tales como aumento del nerviosismo, el incremento del vigor, la irritabilidad, el insomnio y la diuresis) persistieron tras 3

semanas de ingesta continuada. En cambio, el efecto de la cafeína sobre la elevación de la presión arterial se eliminó tras 20 días de ingesta constante¹⁴⁴. Los hallazgos sobre la tolerancia a los efectos secundarios, tanto positivos como negativos, se han identificado mediante experimentos transversales que compararon a los consumidores habituales de cafeína con los consumidores esporádicos¹⁴⁵⁻¹⁴⁷. Por ello, es necesario incrementar la información sobre los posibles efectos secundarios cuando la ingesta es prolongada en el tiempo.

Por otro lado, la interacción del sexo en cuanto a los efectos secundarios de la cafeína parece no estar del todo clara. En un estudio donde comparaban la incidencia en los efectos secundarios tras la ingesta de 3 y 6 mg/kg en 65 adultos jóvenes (30 hombres y 35 mujeres), la frecuencia de aparición de ansiedad o nerviosismo fue más de tres veces superior en mujeres que en hombres. Al mismo tiempo, el 20% de las mujeres y más del 50% de los hombres declararon efectos positivos¹⁴⁸. Asimismo, Temple et al.¹⁴⁹ descubrieron en individuos jóvenes que los hombres pueden ser más susceptibles a los efectos ergogénicos de la cafeína. Por el contrario, en un estudio doble ciego, cruzado y controlado con placebo, demostraron que no había diferencias entre sexos tras una ingesta aguda de 3 mg/kg sobre la incidencia en los efectos secundarios percibidos¹⁴⁰.

En resumen, los efectos secundarios podrían minimizarse utilizando dosis más pequeñas, ya que también resultan ergogénicas y producen menos efectos secundarios; y es necesario adoptar un enfoque individualizado para cada caso, ya que su capacidad para mejorar el rendimiento debe sopesarse con los posibles efectos secundarios.

3.9

Variabilidad interindividual y genética

En base a lo expuesto en los apartados anteriores, se puede concluir que la ergogenicidad de la cafeína está ampliamente respaldada por la literatura científica. Sin embargo, la magnitud de su efecto ergogénico puede variar entre individuos, a pesar de usar la misma dosis relativa al peso corporal. Existen investigaciones que han informado de resultados individuales en las que hay participantes que no obtienen efectos ergogénicos de la cafeína o incluso tienen efectos ligeramente ergolíticos tras la ingesta aguda de cafeína^{121,150,151}. A estos individuos se les conoce como “no respondedores”¹⁵². Sin embargo, recientemente se ha discutido su existencia en una investigación en la que se ha testado a un grupo de participantes en varias ocasiones en la comparación placebo-cafeína¹⁵³. En esta investigación, se encontró que los participantes tenían una respuesta ergogénica a la cafeína, que varió del 9% al 1% entre los individuos, confirmando la variabilidad ergogénica, pero todos los participantes aumentaron los valores de rendimiento con respecto a la ingesta con placebo. Esta variación puede deberse a factores genéticos y ambientales, tales como la tolerancia desarrollada por el uso crónico de cafeína y un inadecuado momento y dosis de administración o estado de entrenamiento^{154,155}.

Las diferencias interindividuales en la respuesta ergogénica a la cafeína pueden deberse en parte a variaciones en genes como el *CYP1A2* (específicamente en el polimorfismo rs762551, también conocido como -163C>A) y posiblemente el *ADORA2A* (rs5751876 o 1976 C > T), que están asociados con el metabolismo, la sensibilidad y la respuesta a la cafeína¹⁵⁶. Existen ciertos polimorfismos de estos dos genes (cambios en secuencia del gen que da lugar a diferentes versiones de ese gen) que afectan a la metabolización de la cafeína o al efecto de la cafeína. Las variaciones genéticas en la enzima *CYP1A2*,

responsable de metabolizar ~95% del metabolismo de la cafeína, pueden alterar las respuestas fisiológicas y de rendimiento a la suplementación aguda con cafeína¹⁵⁷. Los individuos con homocigotos AA ("metabolizadores rápidos") tienden a producir más cantidad de esta enzima y, por tanto, metabolizan la cafeína más rápidamente. Por el contrario, los portadores del alelo C ("metabolizadores lentos") tienden a eliminar la cafeína más lentamente¹⁵⁸. En cuanto al efecto ergogénico, una investigación con 113 participantes¹⁵⁹ determinó que la ingesta de 4 mg/kg de cafeína mejoraba el rendimiento en contrarreloj en los individuos con un genotipo AA con respecto a los portadores del alelo C. Sin embargo, otras investigaciones^{151,160,161} no hallaron ningún efecto del polimorfismo -163C>A del gen *CYP1A2* sobre los efectos de la cafeína en el rendimiento en las pruebas de tenis, baloncesto y Wingate, aunque con tamaños de muestra modestos. Por otro lado, otras investigaciones se han centrado en el gen *ADORA2A*, responsable de codificar los receptores de adenosina A_{2A} y cuyos polimorfismos afectan tanto al consumo de cafeína de forma habitual¹⁶² como a los trastornos del sueño provocados por ella^{163,164}, lo que podría ser perjudicial para los deportistas que la consumen en las últimas horas del día. Además, tras el consumo de cafeína, sus polimorfismos pueden aumentar los niveles de ansiedad, pero también podría ser beneficioso por elevar el nivel de activación antes del ejercicio. Nuevamente, sus resultados son contradictorios ya que se ha encontrado efectos ergogénicos de una ingesta de 5 mg/kg de cafeína sobre las mujeres con un genotipo TT¹⁶⁵, mientras que otras investigaciones no han hallado efecto ergogénico en este genotipo¹⁶⁶. La Figura 4 es una adaptación del estudio de Pickering y Kiely¹⁵⁵ que resume los factores genéticos y no genéticos que pueden ayudar a tomar decisiones sobre la ingesta de cafeína

Actualmente, podemos intuir que no todas las personas responderán igual a una dosis de cafeína, pero se desconoce las causas específicas de esta variabilidad interindividual.

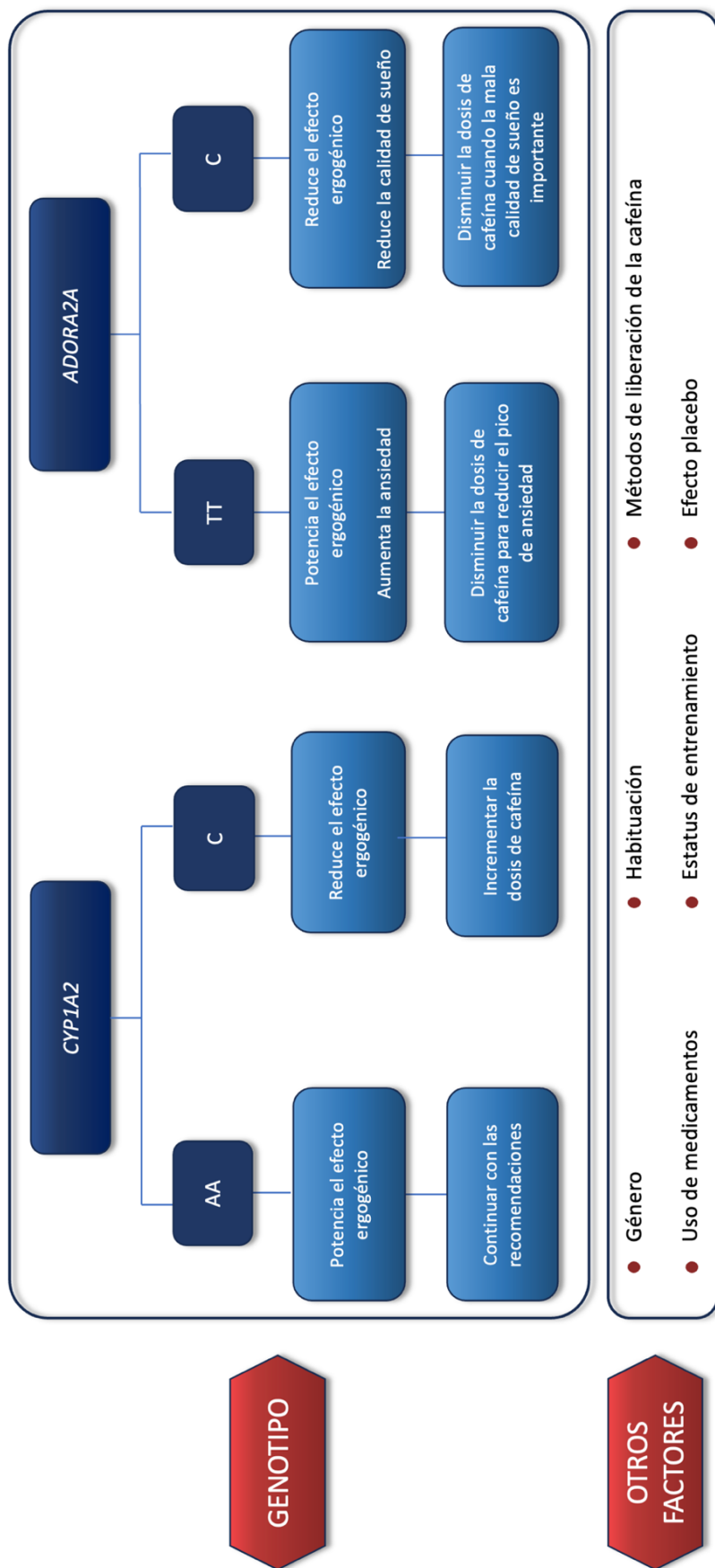
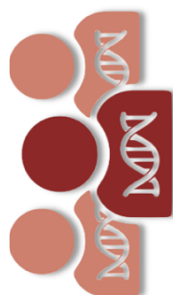


Figura 4. Factores genéticos y no genéticos que pueden influir en las decisiones sobre la ingesta de cafeína. Adaptación de Pickering y Kieley¹⁵⁵.

3.10

Diferencias en función del sexo y posible efecto del ciclo menstrual

En los protocolos y en las recomendaciones para la suplementación con cafeína en atletas se tiende a generalizar entre hombres y mujeres^{78,167}. Sin embargo, la mayoría de los hallazgos meta-analíticos se han realizado con estudios donde la muestra es principalmente con hombres^{20,21,23,137}. Por esa razón, se necesitaría precaución al concluir que el efecto ergogénico de una ingesta de cafeína sea de magnitud similar en hombres y mujeres. Lo cierto es que en los últimos años se ha incrementado el interés por medir el efecto ergogénico de la cafeína en mujeres, y parece indicar que la ingesta aguda de cafeína produce un efecto ergogénico de magnitud similar tanto en hombres como en mujeres¹⁶⁸⁻¹⁷⁰. Concretamente, en el rendimiento neuromuscular, Sabblah et al.¹⁷¹ descubrieron que 5 mg/kg de cafeína producían un efecto comparable sobre la 1RM en el *press banca* en hombres y mujeres. Además, la evidencia apunta a que ambos sexos tienen una farmacocinética similar de la cafeína⁵³. No obstante, gran parte de los estudios presentan una limitación común y es que no tiene en cuenta los posibles efectos del ciclo menstrual en el rendimiento¹⁷², ni por la posible interacción de la cafeína con las fluctuaciones de las hormonas sexuales femeninas durante el ciclo menstrual^{173,174}.

Aunque la farmacocinética de la ingesta aguda de cafeína es similar en las fases folicular, ovulatoria y lútea^{175,176}, los anticonceptivos orales (etinilestradiol) podrían inducir una inhibición de la actividad de la enzima *CYP1A2*¹⁷⁷, reduciendo la tasa de eliminación plasmática de la cafeína¹⁷⁸. A pesar de que se podría hipotetizar que durante la fase folicular tardía el efecto de la cafeína en el rendimiento neuromuscular podría ser mayor al aumento de estrógenos naturales en esta fase, parece que el efecto ergogénico es

similar en las diferentes fases del ciclo menstrual. Esto es debido a que el rendimiento es similar en la fase folicular y lútea en actividades de resistencia aeróbica¹⁷⁹, de resistencia anaeróbica¹⁸⁰ y de fuerza¹⁸¹.

En base a los hallazgos mencionados, podemos señalar que la suplementación con cafeína tiene una magnitud de efecto similar en hombres y en mujeres y las mujeres la pueden consumir sin ninguna interferencia con el ciclo menstrual, aunque tales resultados requieren una mayor evidencia.



4

OBJETIVOS

4

OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

- Evaluar los efectos de la ingesta de cafeína en el rendimiento neuromuscular con una ingesta de cafeína aguda y prolongada.

4.2 Objetivo específico

- Describir la evolución histórica de las características de la investigación sobre los efectos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular.
- Analizar el efecto de la ingesta aguda moderada de cafeína (3 mg/kg) sobre el rendimiento neuromuscular durante un entrenamiento de fuerza de *press banca* basado en la velocidad.
- Determinar los efectos de la ingesta moderada de cafeína (3 mg/kg) sobre las adaptaciones al entrenamiento inducidas por un protocolo de entrenamiento de fuerza de *press banca* consistente en 12 sesiones desarrolladas en 4 semanas.
- Determinar el efecto de una dosis moderada de cafeína (3 mg/kg) sobre el rendimiento neuromuscular y la distancia de lanzamiento de peso en atletas entrenados.
- Determinar la existencia y el curso temporal de la tolerancia a los efectos ergogénicos de una dosis moderada de cafeína (3 mg/kg) en el rendimiento neuromuscular en el *press banca* tras la ingesta continuada durante 22 días.
- Describir la evolución de la concentración de cafeína y paraxantina en orina y la evolución de los cambios inducidos por la cafeína en la presión arterial en reposo, la frecuencia cardíaca y los efectos secundarios tras la ingesta continuada durante 22 días de una dosis moderada (3 mg/kg).

A composite image featuring a gym scene in the background and a coffee-themed foreground. In the background, a person is lying on a bench, performing a bench press with a barbell. The gym environment is brightly lit. In the foreground, a white ceramic coffee cup filled with a frothy beverage sits on a matching saucer, with steam rising from it. The cup and saucer are surrounded by a large pile of dark brown coffee beans on a light-colored wooden surface. To the left of the cup is a small glass jar with a cork lid, also filled with coffee beans.

5

HIPÓTESIS

5

HIPÓTESIS

- La metodología (características de los participantes, modo de suplementación, diseño experimental) en las investigaciones que estudian la cafeína en el rendimiento neuromuscular ha cambiado a lo largo de la historia.
- La ingesta aguda y moderada de cafeína tendrá un efecto ergogénico en el rendimiento neuromuscular de un entrenamiento de fuerza, especialmente en la última serie de un protocolo de *press banca* de 4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM.
- La ingesta moderada de cafeína antes del ejercicio durante un programa de entrenamiento de fuerza en *press banca* de 3 días/semana (4 semanas) provocará mayores adaptaciones neuromusculares que el mismo programa de entrenamiento de fuerza suplementado con un placebo.
- Una dosis moderada de cafeína mejorará el rendimiento neuromuscular y test específicos de lanzamiento de peso; y aumentará la distancia de lanzamiento de competición.
- La concentración de cafeína y paraxantina en orina se reducirá progresivamente cuando se consuma cafeína diariamente a una dosis moderada durante 22 días consecutivos, pero la cafeína seguirá siendo ergogénica para la velocidad en el ejercicio de *press banca*.

6

ESTUDIOS QUE CONFORMAN LA TESIS DOCTORAL

La presente Tesis Doctoral está compuesta por una revisión general y por cuatro investigaciones experimentales llevadas a cabo en el Laboratorio de Fisiología del Ejercicio de la Universidad Camilo José Cela (Madrid) y en las instalaciones de atletismo del Polideportivo Prado de Santo Domingo de Alcorcón (Madrid). En todas las investigaciones experimentales se ha incluido a participantes sanos y con experiencia previa en la especialidad y se ha seguido un diseño de medidas repetidas mediante protocolos controlados con placebo, empleando una metodología doble ciego, aleatorizada y contrabalanceada.

Como resultado de estos estudios, en el momento de redacción de esta Tesis Doctoral, han sido publicados 4 artículos científicos en revistas con factor de impacto en el “Journal Citation Reports” (JCR) en las áreas de ciencias del deporte (Sport Sciences, 2) y nutrición y dietética (Nutrition & Dietetics, 2). En la Tabla 2 podemos observar los títulos y el factor de impacto JCR de cada artículo. Además, en la Tabla 3 podemos encontrar las características del diseño de investigación, las variables dependientes analizadas, las características de los participantes y los principales hallazgos. Se puede consultar una copia completa de cada artículo de la presente Tesis Doctoral (Anexo 4).

Tabla 2. Publicaciones científicas derivadas de los estudios que conforman la Tesis Doctoral.

Estudio	Título	Factor de impacto JCR	Cuartil
1	Giráldez-Costas, V., Coso, J. D., Mañas, A., & Salinero, J. J. (2023). The Long Way to Establish the Ergogenic Effect of Caffeine on Strength Performance: An Overview Review. <i>Nutrients</i> 2023, 15, 1178.	5.9	Q1
2	Giráldez-Costas, V., González-García, J., Lara, B., Coso, J. D., Wilk, M., & Salinero, J. J. (2020). Caffeine Increases Muscle Performance During a Bench Press Training Session. <i>Journal of Human Kinetics</i> . 74. 185-193	2.2	Q3
3	Giráldez-Costas, V., Ruíz-Moreno, C., González-García, J., Lara, B., Del Coso, J., & Salinero, J. J. (2021). Pre-exercise Caffeine Intake Enhances Bench Press Strength Training Adaptations. <i>Frontiers in Nutrition</i> . 8. 622564	6.6	Q1
4	Giráldez-Costas, V., Aguilar-Navarro, M., González-García, J., Del Coso, J., & Salinero, J. J. (2022). Acute caffeine supplementation enhances several aspects of shot put performance in trained athletes. <i>Journal of the International Society of Sports Nutrition</i> . 19(1). 366-380.	5.1	Q1
5	Giráldez-Costas, V., Ruíz-Moreno, C., Coso, J. D., Jiménez-Ormeño, E., Soriano, M.A., & Lara, B. (2023). Time course of tolerance in neuromuscular performance, urine concentration and side effects associated with moderate caffeine intake.	-----	
		Factor de impacto total: 19.8	

Tabla 3. Esquema con las principales características metodológicas y principales resultados de los estudios que conforman esta Tesis Doctoral.

Estudio	Diseño	Participantes	Dosis	VARIABLES DE ESTUDIO	Análisis estadístico	Resultados principales
1	Revisión general.	189 estudios con 3459 participantes (2606 hombres y 676 mujeres).	-	Tamaño de la muestra e información de los participantes; forma y dosificación de la cafeína; habituación y efectos secundarios.	Frecuencias absolutas y relativas. Chi-cuadrado y pruebas de Kruskal-Wallis.	Los estudios sobre los efectos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular suelen incluir entre 11 y 15 adultos, con mayor presencia de hombres que de mujeres. Utilizando una dosis única y ajustada a la masa corporal (~5 mg/kg) en forma de cápsula.
2	Estudio experimental cruzado, doble ciego, aleatorizado y controlado por placebo.	12 participantes (9 hombres y 3 mujeres).	3 mg/kg de cafeína.	Velocidad media y máxima; trabajo mecánico; potencia media y máxima; fuerza media y máxima; y tiempo bajo tensión en <i>press banca</i> .	Prueba t y ANOVA de dos vías de medidas repetidas.	La ingesta de cafeína aumentó la velocidad media y máxima de la barra, la fuerza media, la potencia media y máxima y trabajo mecánico total durante el entrenamiento.
3	Estudio experimental cruzado, doble ciego, aleatorizado y controlado por placebo.	16 participantes (12 hombres y 4 mujeres).	3 mg/kg de cafeína.	Velocidad media y máxima en <i>press banca</i> . Potencia media y máxima en <i>press banca</i> . 1RM.	ANOVA de dos vías de medidas repetidas y tamaño del efecto de Cohen (95%IC).	La ingesta de cafeína aumentó el número de adaptaciones inducidas por el entrenamiento en los valores medios y máximos tanto de velocidad como de potencia con respecto al placebo.
4	Estudio experimental cruzado, doble ciego, aleatorizado y controlado por placebo.	13 lanzadores de peso (8 hombres y 5 mujeres).	3 mg/kg de cafeína.	Dinamometría manual, CMJ, SJ, <i>push-up</i> balístico y lanzamientos de peso.	Prueba t y tamaño del efecto de Cohen (90%IC).	La ingesta de cafeína provocó mejoras moderadas en varios aspectos del rendimiento físico en lanzadores de peso entrenados.
5	Estudio experimental cruzado, doble ciego, aleatorizado y controlado por placebo.	12 participantes (8 hombres y 4 mujeres).	3 mg/kg/día de cafeína.	Velocidad media en <i>press banca</i> al 30, 45, 60, 75 y 90% 1RM. Concentración de orina. Efectos secundarios. Frecuencia cardíaca y presión arterial.	Prueba t, ANOVA de dos vías de medidas repetidas y tamaño del efecto de Cohen (95%IC).	La ingesta diaria de cafeína indujo una mejora y presentó una tolerancia progresiva en la velocidad media en el <i>press banca</i> , se incrementó la concentración de cafeína y paraxantina en orina y en la presión arterial. El tamaño del efecto siguió siendo pequeño después de 22 días de ingesta consecutiva. Sin embargo, tanto en la FC como en los efectos secundarios, excepto el nerviosismo, permanecieron estables durante todo el estudio.

ESTUDIO 1. EL LARGO CAMINO PARA ESTABLECER EL EFECTO ERGOGÉNICO DE LA CAFEÍNA EN EL RENDIMIENTO NEUROMUSCULAR: REVISIÓN GENERAL

1.1 Objetivos

El objetivo de la presente revisión fue describir la evolución de las características de la investigación sobre los efectos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular.

1.2 Material y métodos

Estrategia de búsqueda

La búsqueda de estudios publicados se realizó en las bases de datos PubMed, Scopus y Web of Science (WoS) el 10 de enero de 2023, e incluyó todas las investigaciones publicadas hasta el 31 de diciembre de 2022, sin restricción de años. Los términos de búsqueda incluyeron palabras de texto libre para conceptos clave relacionados con la cafeína y el rendimiento neuromuscular. Los criterios de búsqueda de cada una de las bases de datos se muestran en la Tabla 4.

Los resultados de la búsqueda se descargaron en una hoja de cálculo de Microsoft Excel (Microsoft Corporation, WA, EE.UU.) y posteriormente se filtraron. A continuación, se seleccionaron los títulos y resúmenes para una posterior revisión del texto completo. La búsqueda de estudios publicados fue realizada de forma independiente por dos autores (V.G.C. y J.J.S.) y los desacuerdos se resolvieron mediante discusión. Se realizó una búsqueda secundaria mediante el rastreo de citas de revisiones y meta-análisis sobre la cafeína y el rendimiento neuromuscular.

Tabla 4. Criterios de búsqueda completos para las bases de datos.

Criterios de búsqueda en Pubmed
(caffeine[Title/Abstract] OR energy drink[Title/Abstract] OR coffee[Title/Abstract] OR caffeinated[Title/Abstract]) AND (resistance exercise[Title/Abstract] OR muscle development[Title/Abstract] OR muscle strength[Title/Abstract] OR "strength training"[Title/Abstract] OR "muscle hypertrophy"[Title/Abstract] OR "power production"[Title/Abstract] OR "maximal strength"[Title/Abstract] OR "peak power"[Title/Abstract] OR plyometric[Title/Abstract] OR "force production"[Title/Abstract] OR "resistance training"[Title/Abstract] OR MVC[Title/Abstract] OR "muscle power"[Title/Abstract] OR "maximal voluntary contraction"[Title/Abstract] OR 1RM[Title/Abstract] OR "1-repetition maximum"[Title/Abstract])
Criterios de búsqueda en Scopus
TITLE-ABS(caffeine OR "energy drink" OR coffee OR caffeinated) AND TITLE-ABS("resistance exercise" OR "muscle development" OR "muscle strength" OR "strength training" OR "resistance training" OR "muscle hypertrophy" OR "power production" OR "maximal strength" OR "peak power" OR "plyometric" OR "force production" OR "muscle power" OR "maximal voluntary contraction" OR "MVC" OR "1-RM" OR "1RM" OR "1-repetition maximum")
Criterios de búsqueda en Web of Science
(TI=(caffeine OR "energy drink" OR coffee OR caffeinated)) OR AB=(caffeine OR "energy drink" OR coffee OR caffeinated)AND TI=("resistance exercise" OR "muscle development" OR "muscle strength" OR "strength training" OR "resistance training" OR "muscle hypertrophy" OR "power production" OR "maximal strength" OR "PEAK power" OR "plyometric" OR "force production" OR "muscle power" OR "maximal voluntary contraction" OR "MVC" OR "1-RM" OR "1RM" OR "1-repetition maximum" OR "muscle power") OR AB=("resistance exercise" OR "muscle development" OR "muscle strength" OR "strength training" OR "resistance training" OR "muscle hypertrophy" OR "power production" OR "maximal strength" OR "PEAK power" OR "plyometric" OR "force production" OR "muscle power" OR "maximal voluntary contraction" OR "MVC" OR "1-RM" OR "1RM" OR "1-repetition maximum")

Criterios de inclusión y exclusión

Para justificar su inclusión en el presente análisis, los posibles estudios debían cumplir los siguientes criterios:

- a) Estudios experimentales.
- b) Realizados en participantes humanos hombres y/o mujeres, en cualquier grupo de edad.
- c) Realizados en participantes sanos sin enfermedades o lesiones crónicas conocidas.
- d) Estudios sobre los efectos de la ingesta de cafeína en variables asociadas al rendimiento de fuerza.

Se excluyeron las revisiones sistemáticas y los meta-análisis, además de aquellos estudios originales sin texto completo disponible, los artículos publicados en revistas sin revisión por pares, artículos de opinión, comentarios, informes de casos y editoriales. También se excluyeron las actas de congresos y las presentaciones de pósteres, ya que era inviable certificar el proceso de revisión y evitar la duplicación con los estudios originales. La Figura 5 muestra los detalles de la metodología de selección de estudios. Tras la eliminación de duplicados y la aplicación de los criterios de inclusión/exclusión, se incluyeron en esta revisión un total de 189 estudios.

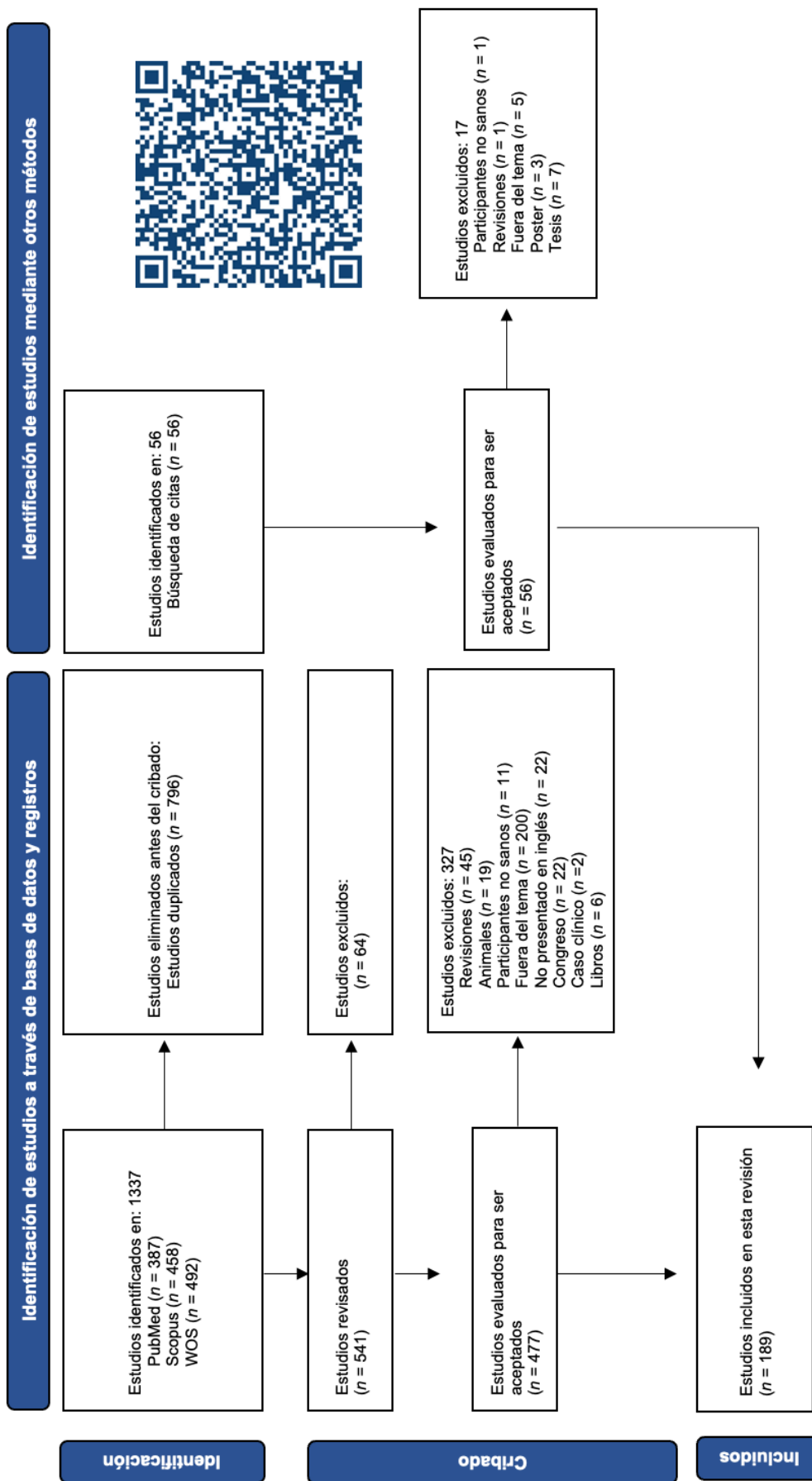


Figura 5. Diagrama de flujo del proceso de búsqueda y selección.

Extracción de datos

Una vez aplicados los criterios de inclusión/exclusión, dos autores (V.G.C. y J.J.S) tabularon de forma independiente la siguiente información en una hoja de cálculo de codificación predefinida utilizando Microsoft Excel (Anexo 1): a) autor(es), título y año de publicación; b) tamaño de la muestra, sexo y edad de los participantes; (c) forma y dosis de la ingesta de cafeína; d) si el experimento incluía una dosis absoluta (en mg) o una dosis ajustada a la masa corporal de cafeína (mg/kg) y si se trataba de una dosis única o de un estudio dosis-respuesta; e) si la cafeína se administraba pura (e.g. cafeína anhidra) o en un suplemento o alimento que contenía otras sustancias (e.g. café, bebidas energéticas, etc...); f) ingesta habitual de cafeína de los participantes; y g) efectos secundarios notificados. Posteriormente, los desacuerdos se resolvieron mediante discusión hasta alcanzar un consenso. Los estudios se agruparon según el año de publicación utilizando los siguientes grupos: antes de 1980, 1980-1999, 2000-2009, 2010-2014 y 2015-2022. Esta agrupación se creó para ofrecer una perspectiva histórica de los estudios publicados, pero aumentando la sensibilidad en los últimos años, ya que existen un mayor número de estudios publicados.

Análisis de datos

Todos los datos se analizaron con el paquete estadístico Jamovi v.2.3¹⁸². Las variables cuantitativas se presentan como media \pm desviación estándar. Se calcularon las frecuencias absolutas y relativas para describir las variables cualitativas. Para analizar las diferencias entre grupos en las variables cualitativas se calcularon tablas de contingencia con el estadístico chi-cuadrado (χ^2). Se utilizó la prueba de Kolmogorov-Smirnov para confirmar la normalidad de las variables cuantitativas. Se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis para analizar las diferencias entre los grupos de años en las variables cuantitativas, ya que no tenían una distribución normal. El nivel de significación se fijó en $p < 0.05$.

1.3 Resultados

Búsqueda general

La Figura 6 muestra el diagrama de flujo de la búsqueda y el proceso de cribado. La búsqueda inicial mostró 1337 estudios. Una vez eliminados los duplicados, se introdujeron 541 estudios para el cribado de título y resumen. Posteriormente, se seleccionaron 477 artículos para la revisión del texto completo, de los que se excluyeron 327 por los siguientes motivos: 45 eran revisiones, 19 se habían realizado en animales, 11 incluían muestras de participantes con alguna patología conocida, 200 estaban fuera del ámbito de esta revisión (e.g. faltaban variables asociadas al rendimiento de fuerza), 22 no estaban escritos en inglés y 30 eran resúmenes de congresos, informes de casos o libros. Además, se identificaron 56 registros a través de la búsqueda de citas incluidas en revisiones y meta-análisis sobre cafeína y fuerza, de los cuales 17 fueron excluidos por los siguientes motivos: 1 se realizó en una muestra de participantes con una patología conocida, 1 era una revisión sistemática, 5 no incluían mediciones sobre variables de rendimiento de fuerza, 3 eran presentaciones de póster y 7 eran tesis doctorales. Finalmente, se incluyeron en esta revisión general un total de 189 estudios que analizaban el posible efecto ergogénico de la cafeína sobre el rendimiento de fuerza.

Participantes. En los estudios incluidos en la revisión, hubo un total de 3459 participantes (2606 varones, 676 mujeres, cinco trabajos no informaron sobre el sexo de los participantes¹⁸³⁻¹⁸⁷, y no fue posible determinar el sexo de 177 participantes). El tamaño medio de la muestra fue de 18.3 ± 13.0 participantes (mediana = 15), con un mayor número de hombres que de mujeres (14.2 ± 11.9 hombres/estudio frente a 3.7 ± 7.0 mujeres/estudio, respectivamente), siendo la mediana de 13 participantes masculinos y de 0 mujeres (Figura 6). En conjunto, el 68.3% (129) de los estudios no incluyeron ninguna participante femenina, mientras que sólo el 12.2% (23) de los estudios no incluyeron participantes masculinos. El tamaño de la muestra más frecuente fue de entre 11 y 15 participantes (71; 37.6%), mientras que el 85.7% de los estudios incluyeron entre 6 y 25 participantes. La mayoría de los estudios se realizaron con adultos jóvenes, con edades medias entre 18 y 35 años. Sólo cinco estudios emplearon participantes con una edad media inferior a 18 años^{186,188-191}, uno se realizó con mujeres

de mediana edad¹⁹² y dos con personas mayores^{193,194}. Dos trabajos no mostraron datos sobre la edad de los participantes^{17,100}. Según el estado de entrenamiento, 6 (3.2%) trabajos describieron a los participantes como no entrenados, 19 (10.1%) trabajos describieron a los participantes como activos y 137 (72.5%) indicaron algún nivel de entrenamiento. Tres estudios (1.6%) mezclaron participantes entrenados y no entrenados^{99,195,196} y 24 (12.7%) no reportaron información sobre el estado de entrenamiento de los participantes.

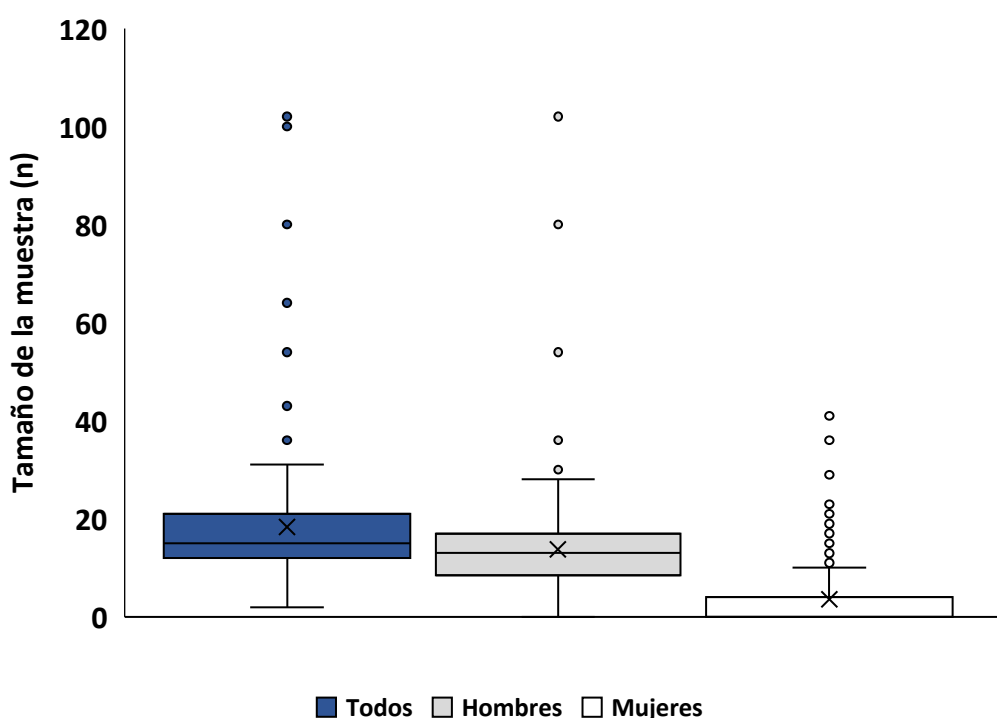


Figura 6. Número de artículos publicados según el tamaño de la muestra y el sexo de los participantes. La línea interior de la caja representa la mediana y el aspa (x) la media. Los bordes superior e inferior representan el percentil 75 y 25.

Suplementos de cafeína. La Figura 7 (panel a) muestra que el 72.0% (136) de los estudios utilizaron dosis de cafeína ajustadas a la masa corporal (dosis única o diseño dosis-respuesta). Los estudios con una dosis de cafeína ajustada a la masa corporal y única (61.4%; 116) utilizaron una dosis media de 4.8 ± 1.4 mg/kg (rango de 1.7 a 7 mg/kg). Además, 20 (10.6%) estudios compararon más de una dosis de cafeína ajustada a la masa corporal en un diseño de dosis-respuesta, incluyendo desde dosis bajas a altas (rango de 1 a 12 mg/kg). Por el contrario, el 28.0% (53) de los estudios utilizaron una dosis absoluta de cafeína para todos los participantes, desde dosis bajas de 50 hasta dosis de 800 mg. En los estudios con una única dosis absoluta de cafeína, el valor medio

empleado fue de 276.1 ± 134.0 mg (cuatro estudios no indicaron la dosis fija utilizada^{99,197-199}). Sólo 4 (2.1%) estudios compararon diferentes dosis fijas, incluyendo dosis bajas y altas (de 100 a 750 mg). Del total, el 73.0% (138) de los estudios utilizaron cafeína en forma pura/aislada (Figura 7; panel b). Sólo el 10.1% (19) de los estudios analizaron la interacción de la cafeína con otras sustancias co-ingeridas (Figura 7; panel c). Aproximadamente, la mitad de los estudios utilizaron cafeína en cápsulas (51.9%. 98), mientras que el 41.3% (78) utilizaron bebidas que contenían cafeína.

Diseño del estudio y otros resultados medidos. Casi todos los estudios analizados (98.4%; 186) utilizaron un diseño controlado con placebo (Figura 7; panel d), y el 68.3% (129) de los estudios informaron sobre el consumo diario de cafeína de los participantes (Figura 7; panel e). Sin embargo, el estudio de los efectos secundarios producidos por la ingesta de cafeína sólo se registró en el 26.5% (50) de los estudios (Figura 7; panel f). En general, la fuerza de la parte superior e inferior del cuerpo se ha investigado de forma similar, donde un 24.9% (47) de trabajos analizaban sólo la fuerza de la parte superior del cuerpo, un 37.6% (71) se centraban sólo en la fuerza de la parte inferior del cuerpo y un 37.6% (71) incluían ejercicios de fuerza tanto de la parte superior como de la inferior del cuerpo.

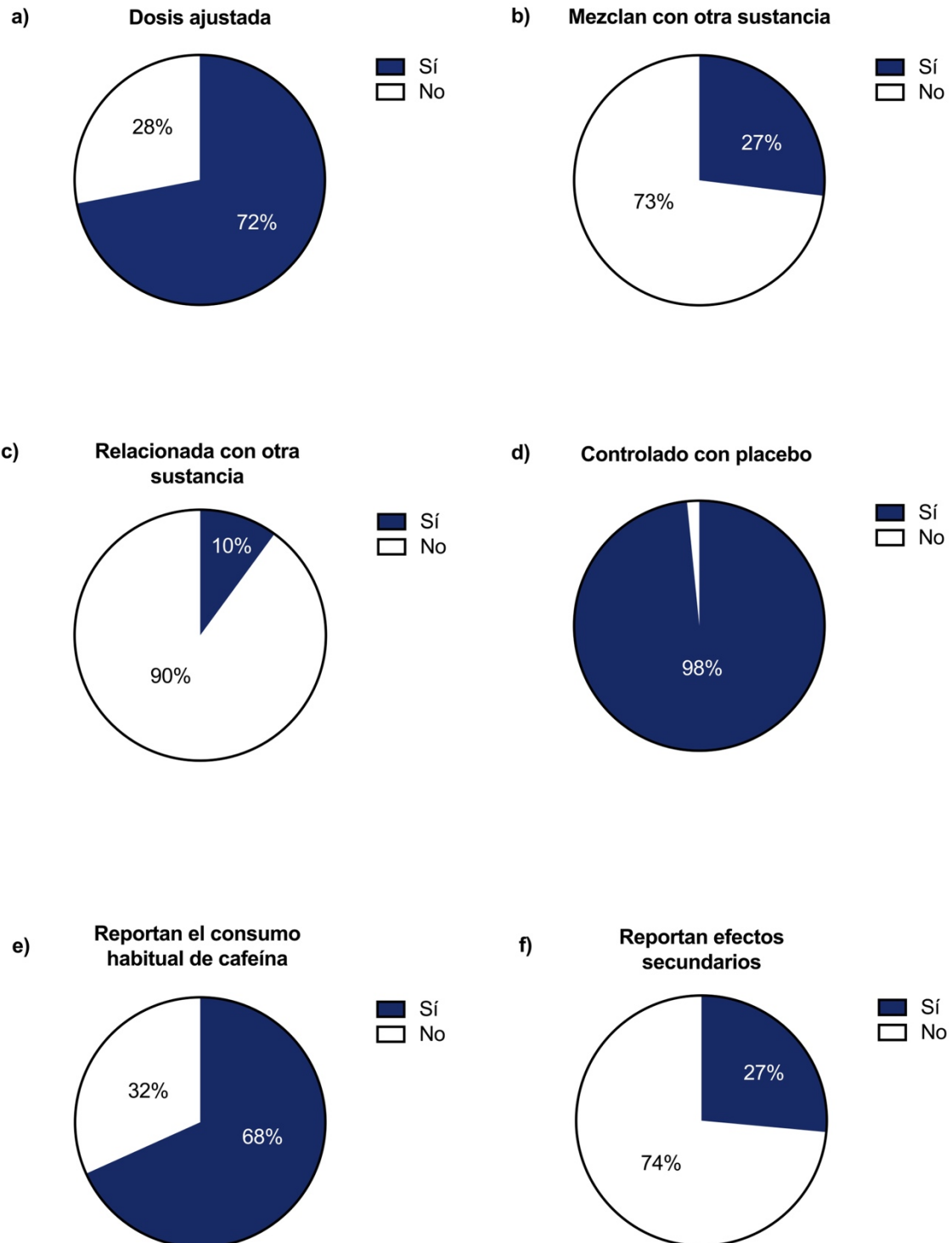


Figura 7. Frecuencia de los estudios publicados sobre el efecto de la cafeína en el rendimiento de fuerza en función del uso (o no) de una dosis de cafeína ajustada a la masa corporal **(a)**, combinación de cafeína con otras sustancias **(b)**, relación con otras sustancias co-ingestionadas **(c)**, situación controlada con placebo **(d)**, reporte de consumo habitual de cafeína de los participantes **(e)** e información sobre efectos secundarios asociados a la cafeína **(f)**.

Análisis temporal

El primer artículo incluido en esta revisión data de 1907. Sin embargo, la investigación sobre la cafeína y el rendimiento de fuerza fue escasa durante el siglo XX. La mayoría de las investigaciones sobre este tema se han publicado en el siglo XXI (94.2%, 178). Nuestros datos mostraron que solo 3 estudios (1.6%) se incluyeron antes de 1980; 8 estudios (4.2%) se publicaron entre 1980 y 1999; 18 (9.5%) se publicaron entre 2000 y 2009, 29 (15.3%) se publicaron entre 2010 y 2014; y 131 estudios (69.3%) se publicaron entre 2015 y 2022. La Tabla 5 muestra la evolución temporal de las muestras, dosis y características metodológicas de los estudios relacionados con los efectos de la cafeína sobre el rendimiento de fuerza.

Participantes. El tamaño de la muestra fue similar entre los grupos de los años establecidos para esta revisión, excepto para los estudios anteriores a 1980 con respecto a 2010-2014 y 2015-2022 ($p < 0.05$) que presentaron tamaños de muestra inferiores. El número medio de participantes masculinos fue de 2.3 ± 0.6 , y no hubo participantes femeninos en los estudios anteriores a 1980. Entre 1980 y 1999, el número medio de participantes masculinos fue de 14.7 ± 7.0 y de 2.3 ± 6.0 para las participantes femeninas. Entre 2000 y 2009, los valores medios para los participantes masculinos y femeninos fueron 13.8 ± 5.6 y 1.9 ± 4.4 , respectivamente. Entre 2010 y 2014, los valores medios de los participantes masculinos y femeninos fueron de 13.8 ± 6.7 y 1.3 ± 3.4 participantes, y los valores medios entre 2015 y 2022 fueron de 14.6 ± 13.6 y 4.6 ± 7.8 participantes, respectivamente.

Suplementos de cafeína. A excepción de los estudios anteriores a 1980, los estudios que emplearon dosis ajustadas a la masa corporal fueron los más frecuentes (del 62.5% al 77.8%; $p = 0.07$). Los estudios con diseños dosis-respuesta fueron inferiores en número con respecto a los que utilizaron una dosis única de cafeína en todos los grupos de años incluidos en esta revisión. Las mayores proporciones de diseños dosis-respuesta se encontraron en 1980-1999 (25.0%, 2) y 2015-2022 (15.3%, 20) aunque sin diferencias significativas con respecto a las otras etapas temporales ($p = 0.21$). Los estudios de 1980 a 1999 utilizaron las mayores dosis medias tanto en dosis de cafeína ajustadas a la masa

corporal (5.8 ± 0.8 mg/kg) como en dosis fijas de cafeína (437.9 ± 69.0 mg). No hubo diferencias significativas en las dosis de cafeína empleadas a lo largo del tiempo en los estudios con dosis de cafeína ajustadas a la masa corporal ni en los estudios con una dosis fija ($p > 0.05$). Hubo diferencias significativas en el uso de formas aisladas frente a formas mixtas de administración de cafeína entre los grupos de años ($p < 0.01$). En todos los grupos de años, excepto en 2010-2014, el efecto de la cafeína se investigó mayoritariamente en forma aislada, oscilando entre el 66.7% y el 87.5%. Sin embargo, para el período 2010-2014, solo el 44.8% de los estudios utilizaron la administración de cafeína pura. En general, solo unos pocos estudios (alrededor del 10%, excepto los anteriores a 2000, en los que no hubo estudios; $p = 0.76$) analizaron la posible interacción de la cafeína con otras sustancias en estudios con múltiples ingredientes. La evolución temporal de las características metodológicas también se reflejó en la forma en que se ingirió la cafeína en los estudios. En general, los resultados mostraron que las cápsulas o comprimidos fueron la forma de administración más utilizada (51.9%, 98); la segunda forma de administración más utilizada fue a través de bebidas (café, bebidas energéticas o cafeína en polvo disuelta en líquido, 41.3%, 78). Desde 2015 han aparecido otras formas de administración de cafeína, como geles (0.8%, 1)¹³⁴, chicles (2.3%, 3)^{135,200,201} y enjuagues bucales (3.8%, 5)^{85,202-205}. Los estudios anteriores al año 2000 analizaron en mayor medida el efecto de la cafeína sobre el ejercicio que implicaba la fuerza de la parte inferior del cuerpo, mientras que en los restantes grupos de años hubo una proporción comparable de estudios sobre la fuerza tanto de la parte inferior como de la superior del cuerpo ($p = 0.05$).

Diseño de los estudios y otros resultados medidos. Los resultados mostraron que, a lo largo del tiempo, casi todos los estudios eran experimentos controlados con placebo, excepto en los estudios anteriores a 1980 ($p < 0.01$). Antes de 1980, ningún estudio informó sobre el consumo habitual de cafeína ni sobre sus efectos secundarios. Después de 1980, aproximadamente dos de cada tres estudios incluyeron información sobre el consumo diario de cafeína de los participantes ($p = 0.13$), pero sólo una minoría (27.5%) informó sobre efectos secundarios ($p = 0.50$). Hasta el año 2000, los estudios realizados sobre la parte superior del cuerpo eran escasos (sólo tres estudios), pero esta situación cambió en los años siguientes con 44 nuevos estudios (total 47; 24.9%) sobre los efectos

de la cafeína en el rendimiento de fuerza de la parte superior del cuerpo y 71 estudios (37.6%) sobre el rendimiento de fuerza tanto de la parte superior como de la inferior del cuerpo ($p = 0.05$). En los últimos años, se ha realizado una proporción similar de estudios sobre la parte inferior y superior del cuerpo.

Tabla 5. Evolución de las principales características de los diseños experimentales de las investigaciones sobre los efectos de la cafeína en el rendimiento de fuerza.

Variables		<1980	1980–1999	2000–2009	2010–2014	2015–2022
n artículos		3 (1.6%)	8 (4.2%)	18 (9.5%)	29 (15.3%)	131 (69.3%)
Tamaño de la muestra	<i>n</i> Total	2.3 ± 0.6	15.5 ± 10.7	15.7 ± 6.9	16.0 ± 7.8 *	19.7 ± 14.4 *
	<i>n</i> Hombres	2.3 ± 0.6	14.7 ± 7.0	13.8 ± 5.6	13.8 ± 6.7	14.6 ± 13.6
	<i>n</i> Mujeres	0	2.3 ± 6.0	1.9 ± 4.4	1.3 ± 3.4	4.6 ± 7.8
Dosis ajustada	Sí	0 (0%)	5 (62.5%)	14 (77.8%)	20 (69.0%)	96 (73.3%)
	No	3 (100%)	3 (37.5%)	4 (22.2%)	9 (31.0%)	35 (26.7%)
Dosis respuesta	Sí	0 (0%)	2 (25.0%)	0 (0%)	2 (6.9%)	20 (15.3%)
	No	3 (100%)	6 (75.0%)	18 (100%)	27 (93.1%)	111 (84.7%)
Dosis	Ajustado (mg/kg)	–	5.8 ± 0.8	5.2 ± 1.3	4.6 ± 1.5	4.8 ± 1.6
	Absoluto (mg)	300	437.9 ± 69.0	180.3 ± 90.6	226.1 ± 95.9	298.3 ± 142.4
Mezclar con otras sustancias	Sí	1 (33.3%)	1 (12.5%)	6 (33.3%)	16 (55.2%)	27 (20.6%)
	No	2 (66.7%)	7 (87.5%)	12 (66.7%)	13 (44.8%)	104 (79.4%)
Relación con otras sustancias co-ingeridas	Sí	0 (0%)	0 (0%)	2 (11.1%)	2 (6.9%)	15 (11.5%)
	No	3 (100%)	8 (100%)	16 (88.9%)	27 (93.1%)	116 (88.5%)
Diseño controlado con placebo	Sí	2 (66.7%)	8 (100%)	18 (100%)	28 (96.6%)	130 (99.2%)
	No	1 (33.3%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (3.4%)	1 (0.8%)
Consumo de cafeína notificado	Sí	0 (0%)	5 (62.5%)	13 (72.2%)	19 (65.5%)	92 (70.2%)
	No	3 (100%)	3 (37.5%)	5 (27.8%)	10 (34.5%)	39 (29.8%)
Efectos secundarios notificados	Sí	0 (0%)	1 (12.5%)	6 (33.3%)	10 (34.5%)	33 (25.2%)
	No	3 (100%)	7 (87.5%)	12 (66.7%)	19 (65.5%)	98 (74.8%)
Forma de administración	Cápsula	1 (33.3%)	4 (50.0%)	11 (61.1%)	9 (31.0%)	73 (55.7%)
	Bebida	1 (33.3%)	4 (50.0%)	7 (38.9%)	20 (69.0%)	46 (35.1%)
	Chicle	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	3 (2.3%)
	Enjuague bucal	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	5 (3.8%)
	Gel	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (0.8%)
	Varias formas	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (0.8%)
	N/A	1 (33.3%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	2 (1.5%)
Tipo de ejercicios	Tren superior	2 (66.7%)	1 (12.5%)	5 (27.8%)	8 (27.6%)	31 (23.7%)
	Tren inferior	1 (33.3%)	7 (87.5%)	8 (44.4%)	7 (24.1%)	48 (36.6%)
	Ambos	0 (0%)	0 (0%)	5 (27.8%)	14 (48.3%)	52 (39.7%)

ESTUDIO 2. LA CAFEÍNA AUMENTA EL RENDIMIENTO NEUROMUSCULAR DURANTE UNA SESIÓN DE ENTRENAMIENTO DE *PRESS BANCA*

2.1 Objetivos

Determinar el efecto de una ingesta aguda de cafeína (3 mg/kg) sobre variables de rendimiento neuromuscular durante una sesión de entrenamiento de *press banca* (4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM realizadas a velocidad máxima).

2.2 Material y métodos

Participantes

Doce participantes activos y sanos (9 hombres y 3 mujeres) se ofrecieron como voluntarios para participar en el presente estudio (edad = 29 ± 8 años; masa corporal = 72.2 ± 9.8 kg; altura = 175 ± 7.0 cm; y grasa corporal = 18.6 ± 8.9 %). Todos los participantes cumplían los siguientes criterios de inclusión: a) edad entre 18 y 45 años; b) bajo consumo de cafeína (< 100 mg/día); c) experiencia previa en el entrenamiento de fuerza. Se excluyeron los participantes que informaron de a) cualquier tipo de lesión en la parte superior del cuerpo en los tres meses anteriores; b) uso de medicamentos o suplementos dietéticos en el mes anterior; c) antecedentes de enfermedades cardiopulmonares; d) el uso de píldoras anticonceptivas orales, ya que pueden interferir con la farmacocinética de la cafeína¹⁷⁷; y e) intolerancia a la cafeína. Se incluyó a los participantes porque se habían inscrito en un programa de entrenamiento de 4 semanas basado en la velocidad del ejercicio de *press banca* y, por tanto, estaban familiarizados con las pruebas experimentales. Antes de inscribirse en el estudio, todos los participantes fueron plenamente informados de los procedimientos y riesgos experimentales, y todos firmaron un consentimiento informado por escrito. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Investigación de la Universidad Camilo José Cela y se realizó de acuerdo con la última versión de la Declaración de Helsinki (Anexo 2).

Diseño experimental

En esta investigación se utilizó un diseño experimental aleatorizado y contrabalanceado, doble ciego y controlado con placebo. Cada participante tomó parte en una sesión pre-experimental seguida de dos ensayos experimentales idénticos separados por al menos cinco días para permitir la recuperación completa, la reproducibilidad de las pruebas y el lavado de sustancias. Los participantes actuaron como sus propios controles para producir un diseño cruzado con medidas repetidas. En los ensayos experimentales, los participantes ingirieron: 3 mg de cafeína por kg de masa corporal (3 mg/kg; Bulk Powders, 100% de pureza, Reino Unido) o la misma cantidad de una sustancia inerte que actuaba como placebo (celulosa, Guinama, España). Las sustancias se ingirieron en cápsulas idénticas no identificables con 200 mL de agua, una hora antes del inicio de la prueba experimental. Cada prueba consistió en un calentamiento estandarizado de 15 minutos, seguido de 4 series de 8 repeticiones del ejercicio de *press banca* con una carga equivalente al 70% de su 1RM (medida en la sesión pre-experimental) (Figura 8). Se animó a los participantes a realizar los levantamientos con la máxima velocidad posible durante cada repetición de *press banca*. Este protocolo se diseñó para simular un entrenamiento basado en la velocidad con un volumen fijo de entrenamiento. En cada repetición, se registró la velocidad de la barra durante la fase concéntrica del ejercicio y se calculó la fuerza, la potencia y el trabajo utilizando la velocidad de la barra y la carga en kg. Los ensayos se realizaron a la misma hora del día y en un entorno de laboratorio con temperatura ambiente controlada ($\sim 21^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa ($\sim 40\%$).

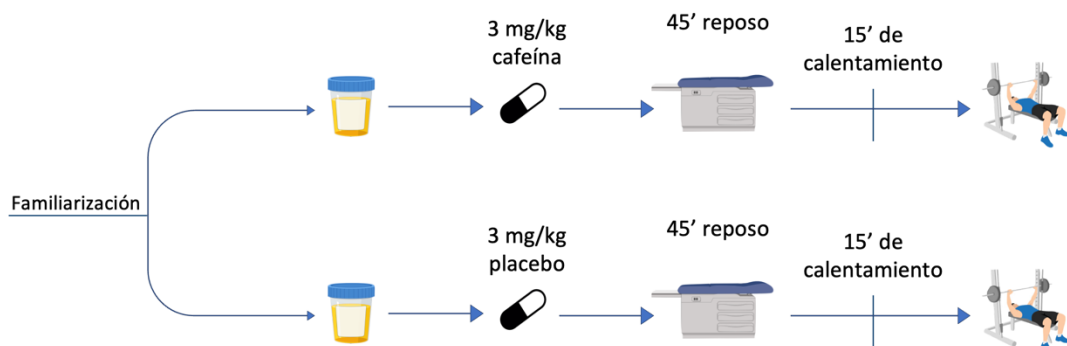


Figura 8. *Diseño experimental de la investigación. Los participantes se sometieron a un protocolo de 4 series y 8 repeticiones al 70% de su 1RM del ejercicio de press banca. Antes de cada sesión, los participantes ingirieron una cápsula que contenía 3 mg/kg de cafeína o un placebo en un orden aleatorio. // 1RM: una repetición máxima.*

Procedimiento pre-experimental

Una vez que los participantes cumplieron todos los criterios de inclusión/exclusión y firmaron el consentimiento informado, se les animó a evitar los suplementos nutricionales y los estimulantes simpático-adrenérgicos durante la duración del estudio. Una semana antes de la primera prueba experimental, los participantes realizaron una sesión pre-experimental destinada a evaluar la 1RM en el ejercicio de *press banca* y a familiarizar a los sujetos con los protocolos experimentales. A su llegada, se pesó a los participantes sin ropa (± 50 g, Radwag, Polonia) para calcular adecuadamente la dosis de cafeína para las pruebas experimentales y se evaluó posteriormente el porcentaje de grasa corporal con bioimpedancia (modelo BC-418, Tanita, Japón). Para la medición de la 1RM, los participantes realizaron un calentamiento de 15 minutos y comenzaron con series de carga creciente estimada entre el 20 y el 90% 1RM¹⁸¹. A continuación, se buscó la 1RM del *press banca* con un límite de cinco intentos máximos permitidos y tres minutos de recuperación entre intentos. La 1RM se identificó como el último levantamiento exitoso con una técnica correcta y este valor se utilizó para estandarizar la carga en los siguientes ensayos experimentales. La prueba de la 1RM se realizó en la misma máquina guiada utilizada para las pruebas experimentales.

Procedimiento experimental

Se instruyó a los participantes para que cumplieran las siguientes condiciones 24 horas antes de cada prueba experimental: a) evitar el ejercicio vigoroso; b) adoptar una dieta y una ingesta de bebidas similares; y c) abstenerse del consumo de alcohol, cafeína y otros estimulantes. El día de las pruebas experimentales, los participantes llegaron al laboratorio por la mañana (entre las 10:00 y las 12:00 horas), habiendo pasado ~3 horas tras la última ingesta sólida. A su llegada, se les proporcionó la cápsula con el tratamiento experimental (cafeína o placebo) y el participante la ingirió. Posteriormente, los participantes descansaron en posición supina durante 45 minutos para permitir la absorción de la sustancia. A continuación, se sometieron a un calentamiento estandarizado de 15 minutos que incluía ejercicios de la parte superior del cuerpo y la ejecución de ejercicios de *press banca* a una velocidad progresiva con

cargas sub-máximas. A continuación, realizaron 4 series de 8 repeticiones del ejercicio de *press banca* en una máquina guiada (Technogym, Barcelona, España) con una carga que representaba el 70% de su 1RM, medida en el ensayo pre-experimental (Figura 9). Se animó a los participantes a realizar cada repetición a su máxima velocidad durante la fase concéntrica del movimiento. El tempo del movimiento durante el protocolo del ejercicio fue 1/2/X/1 (2 s para la fase excéntrica, una pausa de 1 s durante la fase de transición de la fase excéntrica a la concéntrica, con X refiriéndose a la velocidad máxima posible durante la fase concéntrica del movimiento, y el último dígito indicaba una pausa de 1 s entre las fases concéntrica y excéntrica²⁰⁶. Se introdujeron periodos de recuperación de 3 minutos entre series. La técnica de ejecución y la motivación fueron estandarizadas y supervisadas por 2 investigadores experimentados para la reproducibilidad de las condiciones experimentales. Durante cada intento, se registró el desplazamiento de la barra y la duración de la fase concéntrica del movimiento (i.e. el tiempo bajo tensión) con un encoder lineal y el software asociado (1.000Hz, Isocontrol, EV-Pro, España) y se calculó la fuerza media y máxima (N), la velocidad media y máxima (m/s) y la potencia media y máxima (W) para cada repetición. También se calculó el tiempo para obtener los valores máximos en las variables anteriormente mencionadas. El trabajo producido en cada repetición se evaluó utilizando la potencia media y la duración de la fase concéntrica del movimiento. El trabajo total realizado en el entrenamiento se calculó sumando el trabajo producido en cada una de las 32 repeticiones ejecutadas en la prueba.



Figura 9. Participante realizando el entrenamiento de press banca en máquina guiada. Imagen propia.

Análisis de datos

Los datos del estudio se introdujeron a ciegas en el paquete estadístico SPSS (SPSS. v. 22.0. IBM SPSS Statistics. IBM Corporation) y se analizaron posteriormente tras desvelar el ciego. Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para confirmar la normalidad de las variables cuantitativas y, en consecuencia, se utilizó la estadística paramétrica para determinar las diferencias entre los ensayos. Se realizó un análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA) de dos vías (tratamiento \times repetición) a todas las variables de rendimiento neuromuscular investigadas. Después de obtener una prueba F significativa para el efecto principal de la cafeína (corrección de Greenhouse-Geisser cuando fue necesario), se identificaron las diferencias en todas las comparaciones de pares cafeína-placebo mediante pruebas *post hoc* (LSD). Se utilizó una prueba t para muestras relacionadas para detectar diferencias en la comparación cafeína-placebo de la cantidad total de trabajo producido durante el entrenamiento. En todas las pruebas estadísticas se estableció un nivel de significación de $p < 0.05$. Los datos se presentan como media \pm desviación estándar.

2.3. Resultados

La Tabla 6 muestra el efecto de la cafeína sobre las variables de rendimiento neuromuscular durante todo el entrenamiento. En general, y en comparación con el ensayo con placebo, hubo un efecto principal de la cafeína para aumentar la velocidad media de la barra ($p = 0.002$) y la velocidad pico de la barra ($p = 0.006$) durante todo el entrenamiento. Del mismo modo, hubo un efecto principal de la cafeína para aumentar la fuerza media ($p = 0.002$), la potencia media ($p = 0.003$), la potencia máxima ($p = 0.004$), y el trabajo realizado ($p = 0.004$), aunque el efecto principal de la cafeína no alcanzó significación estadística para la fuerza máxima ($p = 0.129$). Además, se encontró un efecto principal significativo de la cafeína en la reducción del tiempo para alcanzar la velocidad máxima ($p = 0.048$), y el tiempo para alcanzar la potencia de salida máxima ($p = 0.024$). Sin embargo, no hubo efecto principal de la cafeína en el tiempo para alcanzar la fuerza máxima ($p = 0.910$) ni en el tiempo bajo tensión ($p = 0.081$). En la mayoría de estas variables hubo un efecto principal de la repetición, lo que indica que los valores de estas variables cambian a lo largo del entrenamiento. Sin embargo, no hubo interacción tratamiento \times repetición en ninguna de las variables de rendimiento (Tabla 6).

Tabla 6. Variables de rendimiento neuromuscular durante una sesión de entrenamiento de press banca que consiste en 4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o de placebo.

Variables (unidades)	Placebo	Cafeína	Δ %	Tratamiento p	Repeticiones p	Interacción p
Velocidad media (m/s)	0.49 \pm 0.07	0.53 \pm 0.06	+7.8	0.002	<0.001	0.329
Velocidad máxima (m/s)	0.84 \pm 0.17	0.92 \pm 0.19	+8.7	0.006	<0.001	0.585
Fuerza media (N)	506 \pm 203	514 \pm 206	+1.5	0.002	<0.001	0.311
Fuerza máxima (N)	665 \pm 282	673 \pm 289	+1.2	0.129	0.462	0.507
Potencia media (W)	240 \pm 86	264 \pm 96	+10.1	0.003	<0.001	0.464
Potencia máxima (W)	427 \pm 147	462 \pm 161	+8.2	0.004	<0.001	0.583
Trabajo (kJ)	205 \pm 70	220 \pm 75	+7.2	0.003	<0.001	0.286
Tiempo hasta la velocidad máxima (ms)	656 \pm 154	632 \pm 114	-3.7	0.048	0.001	0.398
Tiempo hasta la fuerza máxima (ms)	21.0 \pm 20.3	20.5 \pm 17.1	-2.7	0.91	0.509	0.495
Tiempo hasta la potencia máxima (ms)	622 \pm 125	592 \pm 119	-4.8	0.024	0.001	0.359
Tiempo bajo tensión (ms)	873 \pm 115	850 \pm 88	-2.7	0.081	<0.001	0.176

Los datos muestran la media \pm SD para todas las repeticiones (i.e., 32) realizadas en el entrenamiento en 12 individuos.

La Figura 10 muestra la velocidad máxima y la velocidad media en cada repetición durante el entrenamiento para permitir una visión más completa del efecto de la cafeína en el rendimiento neuromuscular. Brevemente, la cafeína aumentó la velocidad pico sobre el placebo en 30 de las 32 repeticiones realizadas durante la sesión de entrenamiento, mientras que el efecto fue similar en las 4 series (todas $p < 0.05$). Asimismo, la cafeína aumentó la velocidad media en 26 de las 32 repeticiones realizadas durante la sesión de entrenamiento (todas $p < 0.05$).

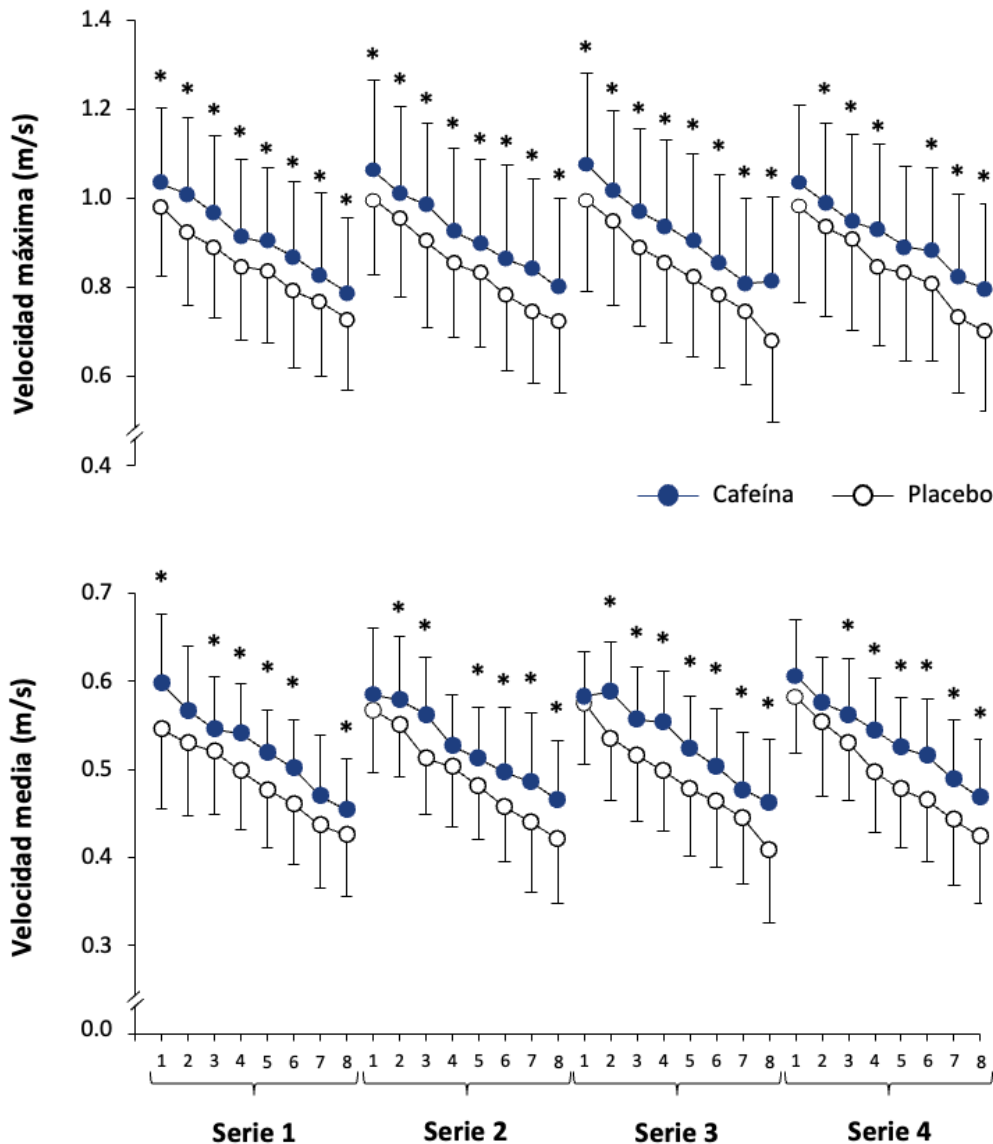


Figura 10. Velocidad máxima y velocidad media durante una sesión de entrenamiento de press banca consistente en 4 series de 8 repeticiones al 70% de su 1RM tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o placebo. Los datos se muestran como media \pm SD para cada repetición realizada en la sesión en 12 individuos. (*) Diferencias significativas entre cafeína y placebo a $p < 0.05$. // 1RM: una repetición máxima.

La Figura 11 representa el trabajo total realizado durante la sesión de entrenamiento como resultado de la suma del trabajo mecánico realizado en cada repetición. En general, la cafeína incrementó el trabajo total realizado en el entrenamiento ($p < 0.05$) con 11 de 12 atletas que presentaron valores más altos de trabajo total con cafeína que con placebo.

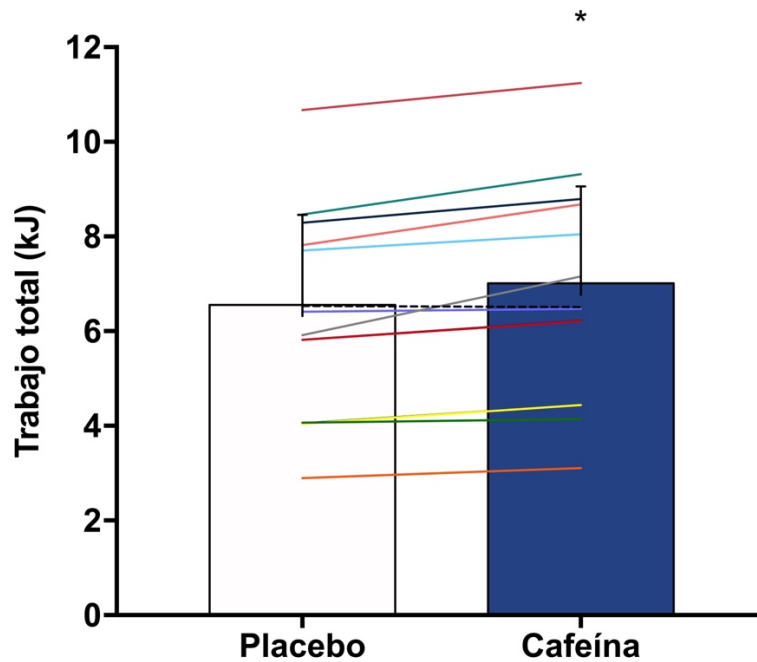


Figura 11. Trabajo total ejecutado durante una sesión de entrenamiento de press banca consistente en 4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o de placebo. El trabajo total realizado en el entrenamiento se calculó sumando el trabajo producido en cada repetición del ejercicio de press banca. Cada línea representa a un individuo de una muestra de 12 individuos. (*) Diferencias significativas entre cafeína y placebo a $p < 0.05$. //1RM: una repetición máxima.

ESTUDIO 3. LA INGESTA DE CAFEÍNA ANTES DEL EJERCICIO MEJORA LAS ADAPTACIONES DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA EN *PRESS BANCA*

3.1 Objetivos

Determinar el efecto de la ingesta de cafeína antes del ejercicio en las adaptaciones de entrenamiento inducidas por un protocolo de entrenamiento de *press banca* de 4 semanas (12 sesiones de entrenamiento).

3.2 Material y métodos

Participantes

Diecisiete participantes activos y sanos (13 hombres y 4 mujeres) se ofrecieron a participar en esta investigación, pero un participante abandonó el estudio, por lo que finalmente 16 completaron todo el diseño experimental. Presentaban una edad media \pm desviación estándar de 27.9 ± 7.2 años; una masa corporal de 71.7 ± 10.0 kg; una altura corporal de 173.0 ± 7.0 cm; un porcentaje de grasa corporal de $18.3 \pm 8.1\%$; y una repetición máxima en *press banca* de 60.4 ± 17.8 kg. Todos los participantes cumplían los siguientes criterios de inclusión a) edad entre 18 y 45 años; b) no haber consumido cafeína o ser consumidores ligeros de cafeína (<0.99 mg/kg/BM/día), como sugirieron previamente Filip et al.²⁰⁷; y c) más de 1 año de experiencia en entrenamiento de resistencia. Los participantes fueron excluidos si informaban de a) una lesión en la parte superior del cuerpo en los 6 meses anteriores; b) el uso de medicamentos en el mes anterior; c) una historia previa de enfermedades cardiopulmonares; d) intolerancia a la cafeína; o e) el uso de píldoras anticonceptivas orales, ya que pueden interferir con la farmacocinética de la cafeína¹⁷⁷. Se animó a los participantes a mantener una dieta que siguiera las directrices nutricionales anteriores para asegurar la disponibilidad de carbohidratos²⁰⁸ y proteínas²⁰⁹; y una correcta hidratación durante todo el experimento²¹⁰ y a distribuir los alimentos en cinco comidas a lo largo del día. Los participantes anotaron sus dietas en un diario personal y un análisis posterior aseguró

que todos los participantes tenían >2.600 kcal/día en los hombres y >2.200 kcal/día en las mujeres, >5 g/kg/día de carbohidratos y >1.6 g/kg/día de proteínas (software PCN 1.0. Cesnid, España). Se animó a los participantes a que mantuvieran sus hábitos de ejercicio aeróbico (e.g., correr, montar en bicicleta, etc...) durante toda la duración del estudio para evitar cualquier efecto de desentrenamiento y a que se abstuvieran de realizar ejercicio vigoroso durante al menos 48 horas antes de la prueba. Se les aconsejó que evitaran cualquier forma de ejercicio de fuerza de la parte superior del cuerpo o de resistencia de la parte superior e inferior del cuerpo durante la duración de la investigación, para evitar la interferencia de otras actividades de ejercicio de resistencia en los resultados de la investigación. Por último, se pidió a los participantes que se abstuvieran de consumir cualquier forma de cafeína en la dieta y de utilizar suplementos alimenticios durante el estudio. Los participantes dieron su consentimiento informado antes de participar en la investigación, tras haber sido informados de los procedimientos experimentales y de los riesgos. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Investigación de la Universidad Camilo José Cela y se realizó de acuerdo con la última versión de la Declaración de Helsinki (Anexo 2).

Diseño experimental

Esta investigación siguió un diseño experimental longitudinal, doble ciego y aleatorizado de dos grupos, controlado por placebo. Todos los participantes realizaron un protocolo de entrenamiento de fuerza de 4 semanas que consistía en 12 sesiones de entrenamiento en el ejercicio de *press banca*, con una frecuencia de 3 sesiones por semana. Los participantes realizaron las sesiones de entrenamiento por la mañana, entre las 9:00 y las 12:00 horas, habiendo pasado al menos ~ 3 horas tras la última ingesta de alimentos. Fueron asignados aleatoriamente a un grupo de cafeína ($n = 9$) o a un grupo de placebo ($n = 7$). Esta diferenciación numérica es debido a que el sujeto que abandonó el estudio pertenecía al grupo placebo. A ambos grupos se les indicó que ingirieran una cápsula opaca e inidentificable 1 h antes del inicio de cada sesión de entrenamiento. La cápsula fue preparada por un investigador especializado que no intervenía en las evaluaciones del experimento y la ingesta fue confirmada por otro investigador. En el grupo de la cafeína, la cápsula contenía una dosis individualizada de

cafeína (3 mg/kg; 100% de pureza, Bulk Powders, Reino Unido) mientras que en el grupo del placebo la cápsula contenía una sustancia inerte (celulosa, Guinama, España). Justo antes y después del protocolo de entrenamiento de fuerza, los participantes realizaron una prueba de la 1RM en el ejercicio de *press banca* y una prueba de fuerza-velocidad utilizando cargas del 10 al 100% 1RM, tal y como se midió en la prueba anterior (Figura 12). Cabe destacar que los participantes no ingirieron ninguna cápsula antes de las sesiones de pre-entrenamiento y post-entrenamiento para aislar el efecto de la cafeína en el protocolo de entrenamiento de fuerza. Las pruebas y las sesiones de entrenamiento se realizaron en un entorno de laboratorio con temperatura ambiente controlada ($\sim 21^{\circ}\text{C}$). La Figura 13 muestra el diseño del estudio.

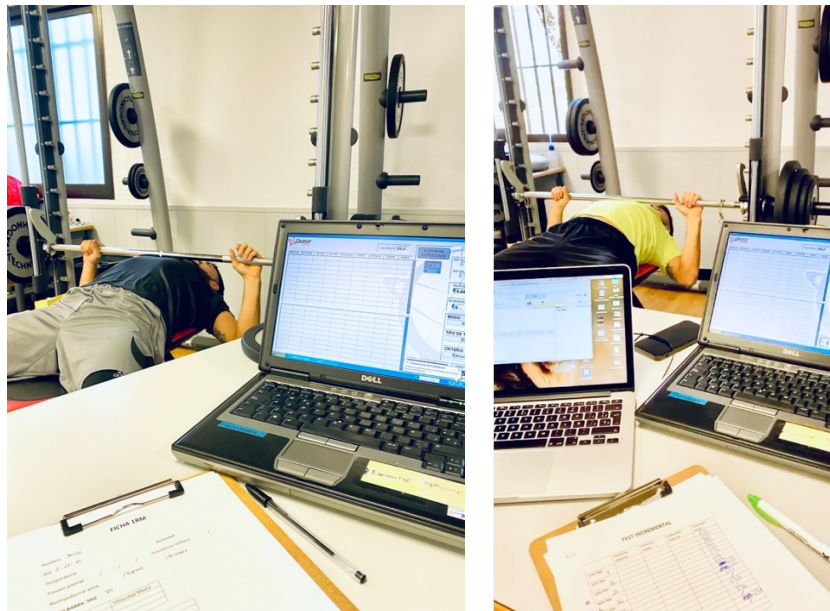


Figura 12. Participante realizando la prueba de la 1RM (imagen de la izquierda) y test incremental en el *press banca* en máquina guiada (imagen de la derecha). Imágenes propias. // 1RM: una repetición máxima.

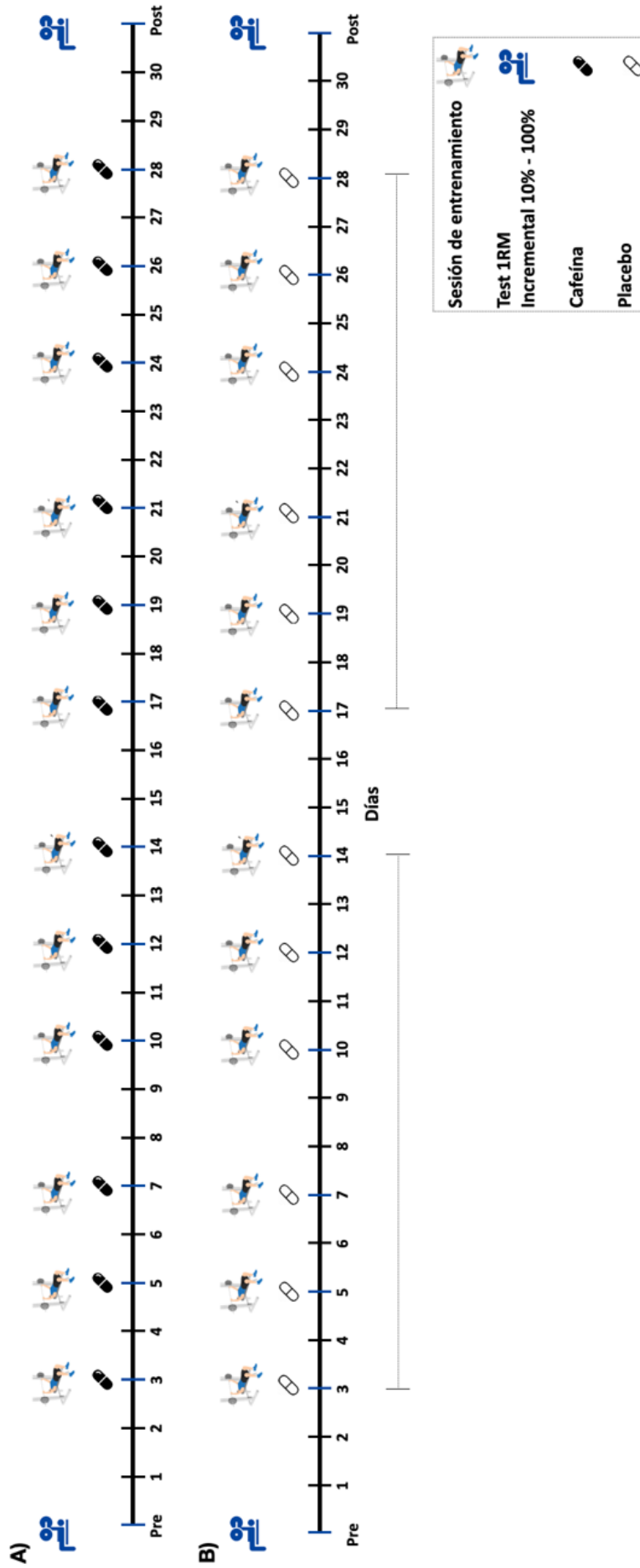


Figura 13. Diseño experimental de la investigación. Los participantes se sometieron a un protocolo de entrenamiento de fuerza consistente en 12 sesiones de entrenamiento en el ejercicio de press banca durante 4 semanas. Durante las 2 primeras semanas, los participantes realizaron 4 series de 10 repeticiones al 60% 1RM y en las 2 últimas semanas realizaron 4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM. Antes de cada sesión de entrenamiento, 9 participantes ingirieron una cápsula que contenía 3 mg/kg de cafeína (A) y 7 participantes ingirieron una cápsula que contenía placebo (B). Antes y

Procedimiento experimental

El día de la prueba experimental previa al entrenamiento, los participantes llegaron al laboratorio por la mañana (entre las 9:00 y las 12:00 horas), habiendo pasado al menos ~3 horas tras la última ingesta sólida. A su llegada, se les pesó sin ropa (± 50 g. Radwag, Polonia) para calcular adecuadamente la dosis de cafeína para el experimento. El porcentaje de grasa corporal se estimó posteriormente mediante impedancia bioeléctrica (modelo BC-418, Tanita, Japón). Para las mediciones de la 1RM en el ejercicio de *press banca*, los participantes realizaron un calentamiento estandarizado de 15 minutos que consistía en ejercicios de movilidad de las articulaciones de la parte superior del cuerpo, seguidos de series de cargas crecientes estimadas entre el 20 y el 90% de la 1RM del participante²¹¹. A continuación, se midió la 1RM del *press banca* con un límite de cinco intentos máximos permitidos y 5 minutos de recuperación entre los intentos. La 1RM se identificó como el máximo levantamiento exitoso con una técnica correcta y se utilizó para estandarizar la carga en la siguiente prueba de fuerza-velocidad y en las sesiones de entrenamiento posteriores. Veinte minutos después de la medición de la 1RM, se realizó la prueba de fuerza-velocidad con cargas entre el 10 y el 100% 1RM, utilizando incrementos del 10%. Los participantes realizaron dos repeticiones máximas del ejercicio de *press banca*, con el fin de obtener la velocidad máxima de la barra durante la fase concéntrica del movimiento con cada carga, y se seleccionó la mejor repetición para el análisis. Si los participantes consideraban que la repetición no era máxima, se les permitía repetir cualquier intento. Se utilizó un estímulo verbal estandarizado para todas las cargas con el fin de ayudar a los participantes a obtener la mayor velocidad²¹² y recibieron información sobre el rendimiento de la velocidad inmediatamente después de cada repetición. La técnica de ejecución fue supervisada por dos investigadores experimentados para garantizar la fiabilidad de las condiciones experimentales. Las pruebas se realizaron en una máquina guiada (Technogym, España) en la que dos guías verticales regulaban el movimiento de la barra. En cada intento, se registró la velocidad de la barra en la fase concéntrica del movimiento con un encoder lineal y su software asociado (1.000Hz, Isocontrol, EV-Pro, España) y se midieron la velocidad media y el pico de velocidad (m/s). La potencia media y máxima (W) se calculó utilizando la carga en kg. La prueba previa al entrenamiento se realizó 72 horas antes de

la primera sesión de entrenamiento y la prueba posterior al entrenamiento se realizó 72 horas después de la última sesión de entrenamiento.

Programa de entrenamiento

El programa de entrenamiento duró 4 semanas e incluyó doce sesiones (3 sesiones/semana, lunes, miércoles y viernes) en el ejercicio de *press banca*. El ejercicio se realizó en la misma máquina guiada empleada para las pruebas. Durante las primeras 2 semanas, los participantes realizaron 4 series de 10 repeticiones al 60% 1RM previa al entrenamiento y en las últimas 2 semanas el protocolo de entrenamiento se cambió a 4 series de 8 repeticiones al 70% 1RM previa al entrenamiento. El programa de entrenamiento se diseñó con el objetivo de maximizar el aumento de la velocidad/potencia máxima en cargas intermedias. Antes del inicio del protocolo de entrenamiento, los participantes recibieron un recipiente de plástico con 12 cápsulas no identificables que se rellenaron con cafeína o placebo según el grupo al que se les asignó. Antes de cada sesión de entrenamiento, los participantes ingirieron la cápsula asignada 60 minutos antes del inicio de las pruebas y descansaron en posición supina durante 45 minutos. A continuación, realizaron un calentamiento estandarizado de 15 minutos que incluía ejercicios de la parte superior del cuerpo y 3 series de 10 repeticiones balísticas de lanzamiento en banco con una carga que representaba ~40% de su 1 RM. Tras el calentamiento, los participantes realizaron el set de entrenamiento de la sesión. El ritmo de movimiento durante el ejercicio fue de 1/2/X/1 (un segundo para la fase excéntrica, una pausa de 2 segundos para la fase de transición de la fase excéntrica a la concéntrica, X refiriéndose a la mayor velocidad posible durante la fase concéntrica del movimiento, y el último dígito indicando una pausa de 1 segundo entre las fases concéntrica y excéntrica^{206,213}). Hubo un período de recuperación de 3 minutos entre las series. Se animó a los participantes a realizar sus levantamientos a la máxima velocidad durante cada repetición de *press banca*. Se utilizó un estímulo verbal estandarizado para todos los participantes²¹² y recibieron información visual entre las series y al final de la sesión de entrenamiento sobre los resultados de potencia y velocidad. La técnica de ejecución fue supervisada por dos investigadores experimentados, sin conocer el tratamiento asignado a cada participante, para garantizar la reproducibilidad de las condiciones experimentales.

Análisis de datos

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SPSS (SPSS, v. 22.0, IBM SPSS Statistics, IBM Corporation, Armonk, NY, EE.UU.). Los datos se distribuyeron normalmente en todas las variables según la prueba de Shapiro-Wilk. En cada carga, se utilizó un análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA) de dos vías (sustancia × tiempo) para identificar los efectos de la cafeína y de la intervención de entrenamiento. Se comprobó el supuesto de esfericidad con la prueba de Mauchly. Se utilizó la corrección de Greenhouse-Geisser (cuando fue necesario) y se identificaron las diferencias en todas las comparaciones de pares cafeína-placebo mediante pruebas *post hoc* (LSD). Además, se calcularon los tamaños del efecto (ES) entre pares utilizando la *d* de Cohen (intervalos de confianza del 95 %) y se interpretaron de acuerdo con los siguientes umbrales: <0.2 trivial; >0.2-0.6 pequeño; >0.6-1.2 moderado; >1.2-2.0 grande; y >2 muy grande. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. El nivel de significación se fijó en $p < 0.05$.

3.3 Resultados

1RM

El cambio de la 1RM inducido por el protocolo de entrenamiento fue similar en ambos grupos [$p = 0.53$; $F(1,14) = 0.42$, Figura 14]. A partir de valores similares previos al entrenamiento (62.50 ± 19.02 y 58 ± 15.98 kg, para cafeína y placebo, respectivamente; $p = 0.11$; ES = 0.06), el entrenamiento de resistencia aumentó los valores de la 1RM tanto en el grupo de cafeína (70.13 ± 20.08 kg, $p < 0.01$; ES = 0.30) como en el de placebo (64.19 ± 17.12 kg, $p < 0.01$; ES = 0.30).

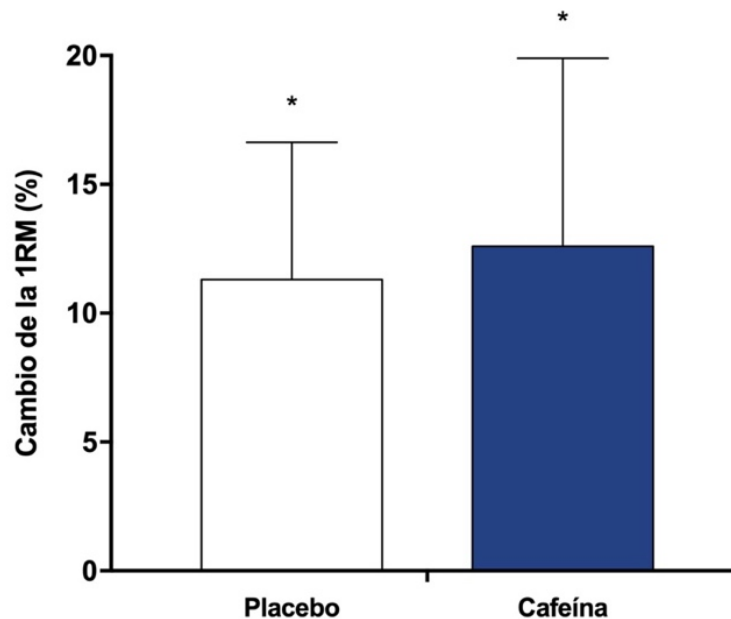


Figura 14. Cambio en el valor de la 1RM en el ejercicio de press banca después de un protocolo de entrenamiento de resistencia de 4 semanas (12 sesiones de entrenamiento) con la ingesta de 3 mg/kg de cafeína ($n = 9$) o de placebo ($n = 7$) antes de cada sesión de entrenamiento. Los datos se muestran como media \pm SD. (*) Diferencia entre pre-entrenamiento y post-entrenamiento dentro del mismo grupo a $p < 0.05$. // 1RM: una repetición máxima.

Variables de velocidad

Velocidad media. No hubo diferencias en los cambios de velocidad media entre los grupos en ninguna carga ($p > 0.05$). Sin embargo, en el grupo de la cafeína, se produjo un aumento de la velocidad media al 40% (0.81 ± 0.08 vs. 0.90 ± 0.14 m/s; $p = 0.01$, ES=0.91), 60% (0.60 ± 0.06 vs. 0.65 ± 0.06 m/s; $p = 0.02$, ES = 0.74), 70% (0.47 ± 0.05 vs. 0.55 ± 0.06 m/s; $p < 0.01$, ES = 1.50), 80% (0.37 ± 0.06 vs. 0.45 ± 0.05 m/s; $p < 0.01$, ES = 1.00), 90% (0.26 ± 0.07 vs. 0.34 ± 0.06 m/s; $p < 0.01$, ES = 0.76) y 100% 1RM (0.14 ± 0.04 vs. 0.25 ± 0.05 m/s; $p < 0.01$; ES = 2.07; Figura 15; panel A). En el grupo placebo, la velocidad media sólo aumentó al 30% (0.95 ± 0.06 vs. 1.03 ± 0.07 m/s; $p = 0.02$; ES = 1.07), 70% (0.51 ± 0.03 vs. 0.57 ± 0.05 m/s; $p = 0.01$; ES = 1.27) y 80% 1RM (0.37 ± 0.06 vs. 0.45 ± 0.05 m/s $p = 0.02$; ES = 0.90).

Velocidad pico. No hubo diferencias en los cambios de velocidad máxima entre los grupos en ninguna carga ($p > 0.05$). Sin embargo, en el grupo de la cafeína, el programa de entrenamiento aumentó la velocidad pico al 10% (2.21 ± 0.37 vs. 2.33 ± 0.36 m/s;

$p=0.01$, ES = 0.26), 30% (1.68 ± 0.16 vs. 1.76 ± 0.19 m/s; $p = 0.04$, ES = 0.43), 40% (1.42 ± 0.14 vs. 1.50 ± 0.17 m/s; $p = 0.01$, ES = 0.48), 50% (1.22 ± 0.14 vs. 1.30 ± 0.19 m/s; $p=0.02$, ES = 0.24), 60% (1.04 ± 0.15 vs. 1.14 ± 0.18 m/s; $p < 0.01$, ES = 0.55), 70% (0.85 ± 0.12 vs. 0.97 ± 0.17 m/s; $p < 0.01$, ES = 0.74), 80% (0.70 ± 0.12 vs. 0.79 ± 0.14 m/s; $p=0.02$, ES = 0.56), 90% (0.58 ± 0.12 vs. 0.66 ± 0.14 m/s; $p = 0.04$, ES = 0.44) y 100% 1RM (0.41 ± 0.08 vs. 0.55 ± 0.14 m/s; $p < 0.01$, ES = 1.11; Figura 15; panel B). En el grupo placebo, la velocidad máxima sólo aumentó al 60% (1.13 ± 0.07 vs. 1.19 ± 0.06 m/s; $p=0.03$, ES = 0.84) y al 70% 1RM (0.97 ± 0.07 vs. 1.04 ± 0.06 m/s; $p = 0.03$, ES = 0.82).

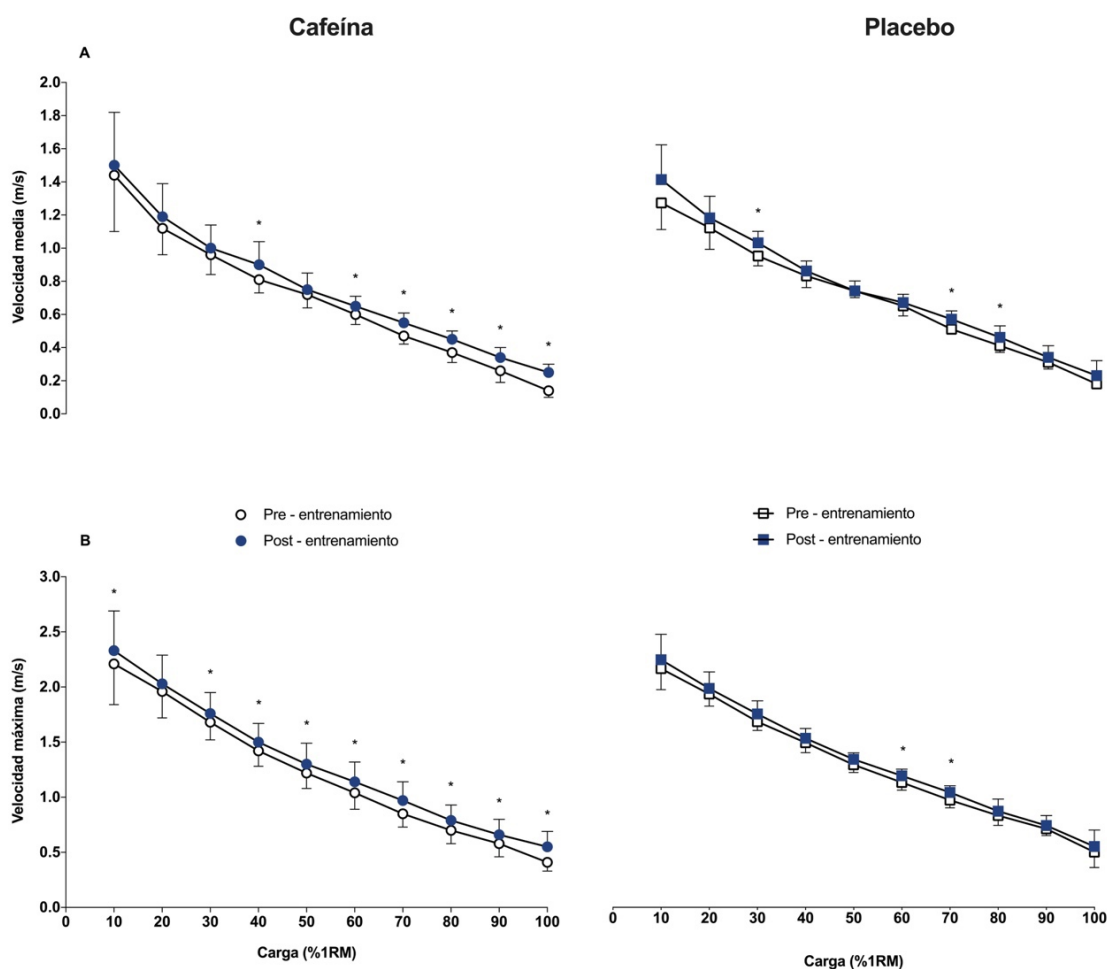


Figura 15. Velocidad media (A) y velocidad máxima (B) durante un ejercicio de press banca con diferentes cargas (del 10 al 100% 1RM) antes y después de 4 semanas de entrenamiento de resistencia (12 sesiones de entrenamiento) con la ingesta de 3 mg/kg de cafeína ($n = 9$) o de placebo ($n = 7$) antes de cada sesión de entrenamiento. Los datos se muestran como media \pm SD para cada carga. (*) Diferencia entre pre-entrenamiento y post-entrenamiento dentro del mismo grupo a $p < 0.05$. // 1RM: una repetición máxima.

Variables de potencia

Potencia media. No hubo diferencias en los cambios medios entre los grupos en ninguna carga ($p > 0.05$). En el grupo de la cafeína, el programa de entrenamiento aumentó la potencia media de salida en un 20% (227.06 ± 103.09 vs. 247.68 ± 111.71 W; $p = 0.01$, ES = 0.14), 30% (268.22 ± 127.56 vs. 288.97 ± 133.55 W; $p = 0.03$, ES = 0.12), 40% (291.24 ± 125.56 vs. 315.85 ± 142.53 W; $p < 0.05$, ES = 0.11), 60% (287.74 ± 121.26 vs. 313.06 ± 122.15 W; $p = 0.01$, ES = 0.18), 70% (246.79 ± 93.09 vs. 299.39 ± 117.98 W; $p < 0.01$, ES = 0.39), 80% (209.35 ± 76.75 vs. 261.62 ± 98.73 W; $p < 0.01$, ES = 0.48), 90% (157.61 ± 58.56 vs. 210.40 ± 74.01 W; $p < 0.01$, ES = 0.66) y 100% 1RM (96.77 ± 45.62 vs. 166.90 ± 58.84 W; $p < 0.01$, ES = 1.10; Figura 16; panel A). En el grupo placebo, la producción media de potencia sólo aumentó al 20% (179.71 ± 64.16 vs. 197.16 ± 71.03 W; $p = 0.04$, ES = 0.18) y al 70% 1RM (230.99 ± 59.61 vs. 261.96 ± 76.47 W; $p = 0.03$, ES = 0.34).

Potencia máxima. No hubo diferencias en los cambios de potencia máxima entre los grupos en ninguna carga ($p > 0.05$). En el grupo de la cafeína, el programa de entrenamiento aumentó la producción de potencia máxima en un 30% (473.14 ± 197.49 vs. 509.18 ± 233.10 W; $p = 0.02$, ES = 0.10), 40% (499.84 ± 212.52 vs. 535.68 ± 230.48 W; $p = 0.02$, ES = 0.10), 50% (508.01 ± 210.92 vs. 558.51 ± 241.32 W; $p = 0.02$, ES = 0.17), 60% (501.03 ± 199.59 vs. 550.08 ± 211.20 W; $p < 0.01$, ES = 0.19), 70% (442.13 ± 142.34 vs. 538.95 ± 215.49 W; $p < 0.01$, ES = 0.39), 80% (402.08 ± 116.70 vs. 471.99 ± 174.43 W; $p = 0.03$, ES = 0.34), 90% (365.14 ± 113.43 vs. 427.31 ± 146.91 W; $p < 0.05$, ES = 0.37) y 100% 1RM (283.43 ± 87.18 vs. 393.35 ± 138.39 W; $p < 0.01$, ES = 0.80); Figura 16; panel B). En el grupo placebo, el protocolo de entrenamiento sólo indujo una diferencia en la producción de potencia máxima al 10% (215.51 ± 65.88 vs. 242.22 ± 63.91 W; $p = 0.03$, ES = 0.32) y al 60% 1RM (465.57 ± 153.15 vs. 503.33 ± 149.75 W; $p = 0.04$, ES = 0.20).

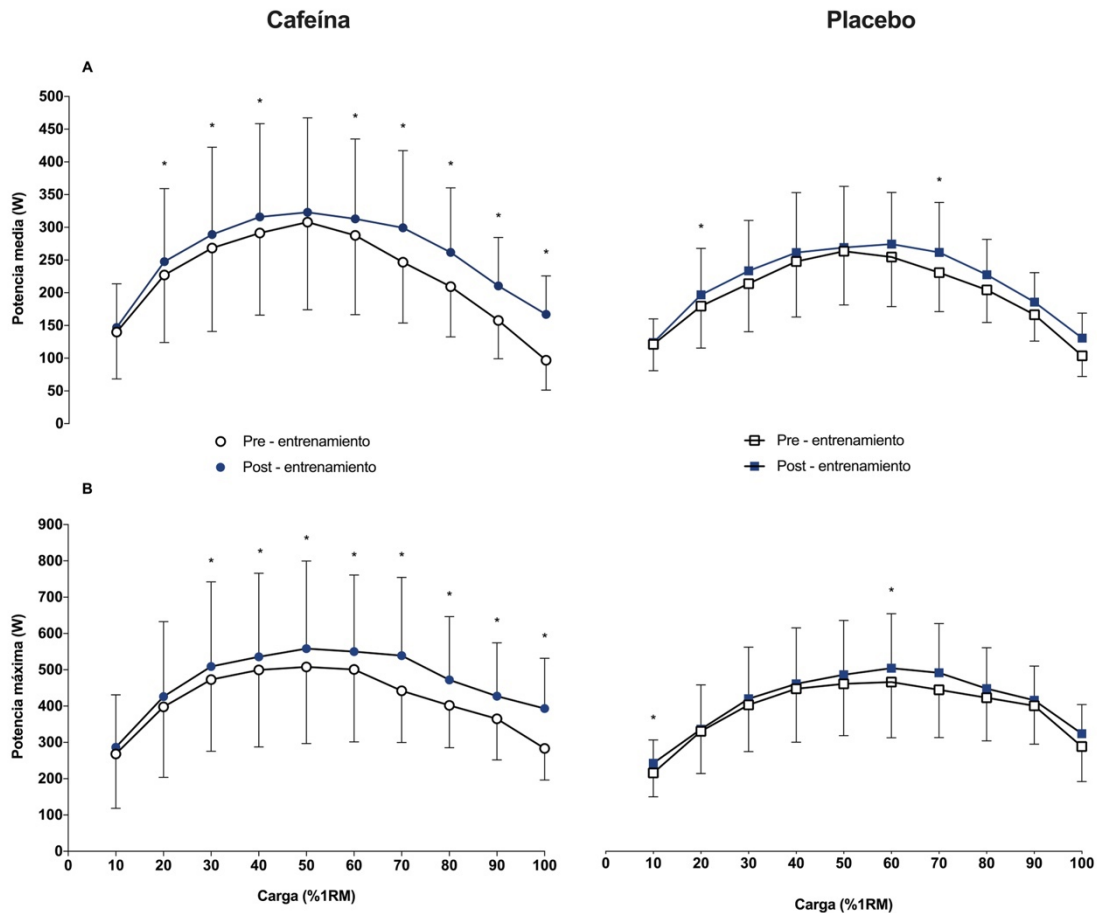


Figura 16. Potencia media (A) y potencia máxima (B) durante un ejercicio de press banca con diferentes cargas (del 10 al 100% 1RM) antes y después de 4 semanas de entrenamiento de resistencia (12 sesiones de entrenamiento) con la ingesta de 3 mg/kg de cafeína ($n = 9$) o de placebo ($n = 7$) antes de cada sesión de entrenamiento. Los datos se muestran como media \pm SD para cada carga. (*) Diferencia entre pre-entrenamiento y post-entrenamiento dentro del mismo grupo a $p < 0.05$. // 1RM: una repetición máxima.

ESTUDIO 4. LA SUPLEMENTACIÓN CON CAFEÍNA MEJORA VARIOS ASPECTOS DEL RENDIMIENTO EN LANZAMIENTO DE PESO EN ATLETAS ENTRENADOS

4.1 Objetivos

Determinar el efecto de una dosis individualizada y moderada de cafeína (3 mg/kg) sobre la potencia neuromuscular, pruebas de rendimiento específicas del lanzamiento de peso y sobre un lanzamiento de peso reglamentario en lanzadores de peso entrenados.

4.2 Material y métodos

Participantes

Trece lanzadores de peso entrenados (8 hombres y 5 mujeres) se ofrecieron voluntarios para participar en esta investigación. Una estimación a priori del tamaño de la muestra reveló que para una potencia del 80% [$1 - \beta = 0.8$; $\alpha = 0.05$; G*Power (v3.1.9.6)] se necesitaban al menos 11 participantes en base al tamaño del efecto obtenido previamente empleando cafeína en un lanzamiento de peso desde parado con lanzadores entrenados²¹⁴. Los participantes tenían una edad media \pm desviación estándar de 24.5 ± 10.0 años; masa corporal de 92.8 ± 20.6 kg; altura corporal de 180.2 ± 8.7 cm; experiencia de entrenamiento en la disciplina de 8.7 ± 6.9 años; frecuencia de entrenamiento de 8.0 ± 3.3 sesiones/semana; y consumo diario de cafeína de 1.5 ± 0.9 mg/kg/día. Todos los participantes cumplían los siguientes criterios de inclusión: a) edad entre 18 y 45 años; y b) más de 1 año de experiencia en el entrenamiento de lanzamiento de peso. Los participantes fueron excluidos si declaraban a) lesión deportiva en los dos meses anteriores; b) uso de medicación en el mes anterior; c) intolerancia a la cafeína; o d) uso de píldoras anticonceptivas orales, ya que pueden interferir con la farmacocinética de la cafeína¹⁷⁷. Se pidió a los participantes que se abstuvieran de consumir cualquier forma de cafeína en la dieta y de utilizar suplementos dietéticos mientras durara el estudio. Todos los participantes se familiarizaron con los

procedimientos de prueba empleados en el presente experimento como parte de sus rutinas de entrenamiento. Además, los participantes reprodujeron las pruebas de fuerza y potencia en el mismo orden y con los tiempos de recuperación establecidos para el experimento en una sesión de entrenamiento una semana antes del inicio del experimento. Los participantes recibieron formularios de consentimiento informado antes de participar en la investigación en los que se les informaba de los procedimientos experimentales y de los riesgos. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Investigación de la Universidad Camilo José Cela y se realizó de acuerdo con la última versión de la Declaración de Helsinki (Anexo 2).

Diseño experimental

En esta investigación se utilizó un diseño experimental doble ciego, controlado con placebo, aleatorizado y contrabalanceado. Cada participante tomó parte en dos pruebas experimentales idénticas separadas por siete días para permitir la recuperación completa, la reproducibilidad de las pruebas y la eliminación de la sustancia. Los participantes actuaron como sus propios controles para producir un diseño cruzado con medidas repetidas en el que sólo la sustancia ingerida antes de la prueba difería entre los ensayos. En los ensayos experimentales, los participantes ingirieron: a) 3 mg/kg de cafeína (Bulk Powders, 100% pureza, Reino Unido); o b) la misma cantidad de una sustancia inerte que actuaba como placebo (celulosa, Guinama, España). Esta dosis se seleccionó de acuerdo con la evidencia actual sobre la dosis de cafeína para producir un efecto ergogénico en el rendimiento deportivo^{7,21,215}. Las sustancias se ingirieron en cápsulas idénticas no identificables con 200 mL de agua 45 minutos antes del inicio de las pruebas experimentales (Figura 17). Las pruebas se realizaron a la misma hora del día y en una instalación de entrenamiento de lanzamiento de peso al aire libre con temperatura ambiente (~14°C) y humedad relativa (~40%) similares.

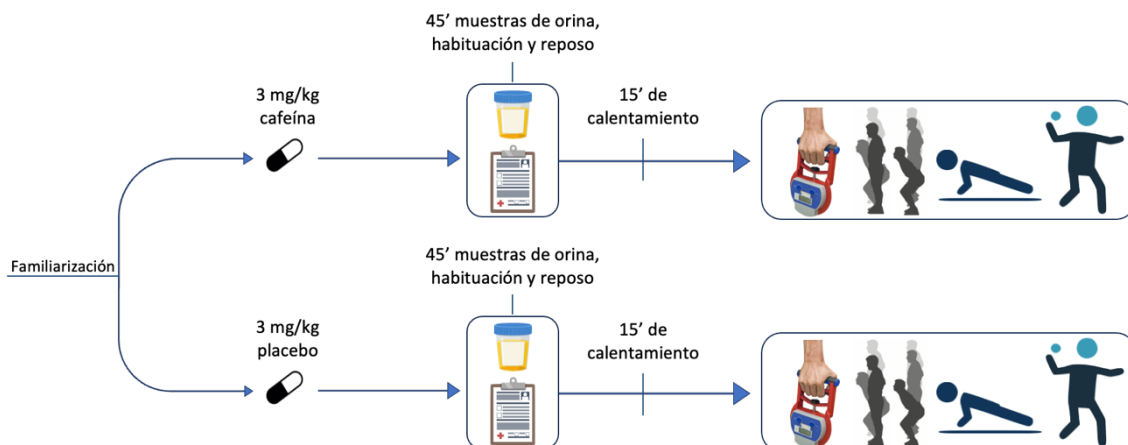


Figura 17. Diseño experimental de la investigación. Trece lanzadores de peso se sometieron a unas pruebas de rendimiento que consistían en el ejercicio de dinamometría manual, salto de CMJ y SJ, push-up balístico y lanzamientos de peso (hacia atrás, parado y completo). Antes de cada protocolo, los participantes ingirieron una cápsula que contenía 3 mg/kg de cafeína o un placebo en un orden aleatorio.

Diseño experimental

Los participantes fueron instruidos para cumplir las siguientes condiciones 24 horas antes de cada prueba experimental: a) evitar el ejercicio vigoroso; b) adoptar una dieta y una ingesta de bebidas similares; c) abstenerse del consumo de alcohol, cafeína y otros estimulantes. El día de las pruebas experimentales, los participantes llegaron a las instalaciones por la mañana (entre las 9:00 y las 13:00 horas), habiendo pasado al menos ~3 horas tras la última ingesta sólida. A su llegada, se les proporcionó la cápsula con el tratamiento experimental (cafeína o placebo) y el participante la ingirió. A continuación, los participantes descansaron durante 45 minutos mientras rellenaban un Cuestionario de Frecuencia Alimentaria (FFQ) validado previamente²¹⁶ para evaluar la ingesta diaria de cafeína. Se utilizaron porciones para evaluar la cantidad de comida consumida y se identificaron las marcas exactas de los productos consumidos para calcular con precisión el consumo de cafeína. La ingesta habitual de cafeína se estimó a partir de las respuestas proporcionadas al FFQ. A continuación, se sometieron a un calentamiento estandarizado de 15 minutos idéntico a sus rutinas de competición, que consistió en correr, ejercicios para la parte superior e inferior del cuerpo y varias formas de lanzamiento con balones medicinales. A continuación, los atletas comenzaron con las pruebas físicas siguientes:

Dinamometría manual. Cada participante realizó dos contracciones voluntarias isométricas máximas tanto con la mano dominante como con la no dominante. Se utilizó para el análisis el valor de fuerza más alto de los dos intentos, separados por 1 minuto de descanso. Cada participante realizó esta prueba con el hombro y el codo en posición anatómica, el antebrazo y la mano en posición neutra, y la fuerza de prensión de la mano se midió con un dinamómetro digital (Takei 5101, Japón).

CMJ y SJ. Tras 2 minutos de recuperación, el participante realizó dos CMJ máximos y dos SJ máximos, con los intentos separados por un minuto de descanso y tres minutos entre los tipos de salto. Se indicó a los participantes que saltaran lo más alto posible y se utilizó para el análisis el salto más alto de cada tipo de salto. Los brazos se colocaron sobre las caderas durante las pruebas de salto para evitar la influencia del balanceo de los brazos en la altura del salto y un investigador verificó que el despegue y el aterrizaje se realizaban en una posición correcta. Tanto el CMJ como el SJ se realizaron en una plataforma Force-Decks FD4000 Dual Force Platform (ForceDecks, Reino Unido), con una frecuencia de muestreo de 1.000 Hz. Para el análisis se utilizó el mejor valor en base a la altura de salto; y en cada salto, se registraron la potencia y la velocidad máximas durante la fase concéntrica del movimiento, ya que la potencia neuromuscular y la velocidad en el despegue se han asociado con la distancia del lanzamiento de peso durante el periodo de competición²¹⁷.



Figura 18. Deportistas realizando un salto CMJ (imagen de la izquierda) y SJ (imagen de la derecha). Imágenes propias.

Push-up balístico. Tras 2 minutos de recuperación, los participantes se tumbaron y colocaron las manos sobre la plataforma de doble fuerza Force-Decks FD4000, separadas aproximadamente a la altura de los hombros, y bajaron el pecho hasta entrar en contacto con las plataformas. A la orden, los participantes realizaron el ejercicio a la máxima velocidad. Para esta prueba, los participantes extendieron los brazos lo más rápido posible para perder el contacto de las manos con las plataformas mientras las puntas de los pies estaban siempre en contacto con el suelo. Cada participante realizó dos *push-up* a máxima velocidad separadas por 1 minuto de descanso entre intentos. Para el análisis se utilizó el mejor en base a la altura. También se registraron la potencia y la velocidad máximas durante la fase concéntrica.



Figura 19. Deportista realizando el ejercicio de *push-up* balístico. Imagen y vídeo propios (QR).

Lanzamientos de peso. Tras las pruebas mencionadas, los participantes se dirigieron la zona de entrenamiento de lanzamiento de peso y realizaron un calentamiento adicional de 5 minutos que incluía diferentes tipos de lanzamientos con el peso oficial. Todas las pruebas de lanzamiento se realizaron en un círculo oficial al aire libre con suelo de hormigón. Los participantes realizaron los lanzamientos con un peso oficial para mujeres (4 kg) y para hombres (7.26 kg). Cada participante realizó tres intentos para cada tipo de lanzamiento, con los intentos separados por 3 minutos de descanso y 5 minutos entre los tipos de lanzamiento. Para el análisis estadístico se utilizó el lanzamiento de mayor

distancia. Se animó a los participantes a realizar lanzamientos de máxima distancia en cada intento, y se encontraban en un entorno similar al de la competición. Además, se estandarizó la motivación. Los tres tipos de lanzamiento son habituales en las rutinas de entrenamiento y por tanto estaban plenamente familiarizados con estos.

En primer lugar, se realizó un lanzamiento hacia atrás. Para este lanzamiento, los participantes se colocaron en dirección contraria a la del lanzamiento. A continuación, agarraron el artefacto oficial con ambas manos, flexionaron las rodillas y bajaron el peso hasta colocarlo entre las rodillas. A partir de esta posición, los participantes realizaban una extensión de rodilla, cadera y hombros para lanzar el peso hacia atrás por encima de sus cabezas, intentando alcanzar la máxima distancia. En segundo lugar, se realizó un lanzamiento de peso desde parado (i.e., sin fase de vuelo ni desplazamiento previo, desde la posición de doble apoyo). Para el lanzamiento desde parado, los participantes separaban los pies aproximadamente a la anchura de los hombros y realizaban la fase de lanzamiento desde este doble apoyo, intentando alcanzar la máxima distancia. Por último, se ejecutó un lanzamiento de peso completo de acuerdo con las reglas de *World Athletics* (si el atleta realizaba un nulo, realizó un lanzamiento adicional). Los participantes realizaron el lanzamiento de peso completo con técnica lineal ($n = 5$) o de rotación ($n = 8$) según sus hábitos. La técnica se mantuvo constante en todos los intentos y en todos los ensayos experimentales. Se calcularon el coeficiente de correlación intraclass (ICC), el error estándar de medida (SEM) y el cambio mínimo detectable (MDC) para el lanzamiento hacia atrás, para el lanzamiento de peso desde parado y para el lanzamiento de peso completo a partir de los dos mejores lanzamientos de cada prueba en la condición placebo, con los siguientes resultados: lanzamiento hacia atrás: ICC = 0.966; SEM = 0.058; MDC = 0.16 m; lanzamiento de peso de pie: ICC = 0.973; SEM 0.034; MDC = 0.10 m; lanzamiento completo de completo: CCI = 0.984; SEM = 0.033; MDC = 0.09 m. El SEM se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula: $SEM = s \pm \sqrt{1 - ICC}$. El MDC se calculó del siguiente modo: $MDC = SEM * 1.96\sqrt{2}$ ²³.



Figura 20. Lanzamientos de peso. Lanzamiento hacia atrás (imagen de la izquierda), lanzamiento desde parado (imagen central) y lanzamiento completo (imagen de la derecha). Imagen y vídeo propios (QR).

Al final de cada prueba experimental, los atletas debían rellenar un cuestionario sobre su percepción de la potencia neuromuscular. El cuestionario de percepción de la potencia neuromuscular incluía una escala de 1-10 puntos, y se informó previamente a los participantes de que 1 punto significaba una cantidad mínima y 10 puntos una cantidad máxima. Este cuestionario también incluía una pregunta en la que los participantes tenían que señalar si creían que habían recibido cafeína o placebo, para evaluar el éxito del procedimiento de cegamiento de los participantes. Además, se proporcionó a los participantes una encuesta sobre efectos secundarios que debían rellenar antes de irse a dormir para determinar si habían percibido algún efecto secundario asociado a la cafeína las horas posteriores a la ingesta de la cápsula. En esta encuesta se preguntaba por el nerviosismo, los problemas gastrointestinales, el dolor muscular, la irritabilidad, la diuresis, el dolor de cabeza y la actividad de los participantes mediante una escala dicotómica sí/no. Estos cuestionarios se han utilizado anteriormente para evaluar la ergogenicidad percibida y la prevalencia de efectos secundarios tras la ingesta de cafeína en el contexto deportivo¹⁴⁰. Los participantes que no completaron estos cuestionarios a tiempo fueron eliminados del análisis. Así, tres participantes fueron excluidos del análisis estadístico basándose en este criterio.

Análisis de datos

Los datos del estudio se analizaron en el paquete estadístico JAMOV (v. 2.2.5)¹⁸² y se analizaron posteriormente. Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para confirmar la normalidad de cada variable. Todas las variables presentaban una distribución normal y, en consecuencia, se utilizaron estadísticos paramétricos para determinar las diferencias entre los ensayos. Se realizó una prueba t para muestras relacionadas para comparar los valores de rendimiento con placebo frente a cafeína en todas las pruebas físicas. Además, se calcularon los tamaños del efecto (ES) mediante la *d* de Cohen y se interpretaron de acuerdo con los siguientes umbrales: < 0.20 trivial; ≥ 0.20-0.59 pequeño; ≥ 0.60-1.19 moderado; ≥ 1.20-1.99 grande; y ≥ 2.00 muy grande²¹⁸. Los resultados se expresan como media ± desviación estándar. Los datos sobre los efectos secundarios se presentan como porcentajes para representar la proporción de atletas que informaron de cada efecto secundario. Las diferencias en la prevalencia de cada efecto secundario tras la ingesta de cafeína o placebo se analizaron mediante la prueba de McNemar. La evaluación del cegamiento se realizó con el índice Kappa y el índice de Bang²¹⁹. En todas las pruebas estadísticas, el nivel de significación se fijó en $p < 0.05$.

4.3 Resultados

No hubo diferencias entre la cafeína y el placebo para la fuerza de prensión de la mano dominante (48.22 ± 12.18 vs. 48.38 ± 13.01 kg, ES = -0.06, $p = 0.843$) o la mano no dominante (43.35 ± 11.35 vs. 42.86 ± 12.25 kg, ES = 0.13, $p = 0.642$). Los efectos de la cafeína en las variables de rendimiento CMJ, SJ y *push-up* se muestran en la Tabla 7. La cafeína aumentó significativamente la altura del salto CMJ (+5.0%, ES = 0.82, $p = 0.012$), la potencia máxima (+2.5%, ES = 0.70, $p = 0.027$) y la velocidad máxima (+1.8%, ES = 0.67, $p = 0.033$) durante la fase concéntrica del salto. En el SJ, la cafeína aumentó la altura del salto (+6.4%, ES = 0.63, $p = 0.042$), y la velocidad pico concéntrica (+2.8%, ES = 0.65, $p = 0.037$). Sin embargo, no hubo diferencias estadísticamente significativas en el *push-up* balístico entre la cafeína y el placebo ($p > 0.05$), aunque los valores para la cafeína fueron siempre superiores para la altura (+16.2%, ES = 0.56, $p = 0.110$), la potencia máxima (+12.7%, ES = 0.70, $p = 0.055$) y la velocidad máxima (+10.6%, ES = 0.62, $p = 0.082$).

Tabla 7. Variables de CMJ, SJ y Push-up ballistico tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o de placebo.

	CMJ		SJ		Push-up	
	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína
Altura de salto (imp-mom) [cm]	32.3 ± 7.6	33.8 ± 8.0*	29.9 ± 8.2	31.4 ± 7.5*	9.3 ± 4.5	12.7 ± 8.3
Velocidad máxima (m/s)	2.6 ± 0.3	2.7 ± 0.3*	2.5 ± 0.3	2.6 ± 0.3*	1.9 ± 0.3	2.1 ± 0.5
Potencia máxima (W)	4496.2 ± 1384.5	4617.2 ± 1471.9*	4548.9 ± 1450.4	4631.7 ± 1377.9	1496.2 ± 453.4	1753 ± 683.3
		ES		ES		ES
		0.3		0.3		0.2
		0.2		0.2		0.4
		0.1		0.3		0.2

Los datos se muestran la media ± SD. (*) Diferencias significativas entre cafeína y placebo a $p < 0.05$.

La Figura 21 muestra las distancias individuales obtenidas en las diferentes pruebas de lanzamiento para facilitar una visión más completa del efecto de la cafeína. La cafeína aumentó la distancia obtenida en el lanzamiento de peso desde parado con respecto al placebo (10.55 ± 1.94 vs. 10.27 ± 1.77 m; +2.6%, ES = 0.87, $p = 0.009$). De 13 lanzadores de peso, 11 mejoraron la distancia obtenida en el lanzamiento de peso desde parado con la ingesta de cafeína. Sin embargo, no hubo diferencias significativas en el lanzamiento de espaldas (13.21 ± 2.07 vs. 13.15 ± 1.85 m; +0.3%, ES = 0.13, $p = 0.638$) ni en el lanzamiento de peso completo (11.35 ± 2.57 vs. 11.24 ± 2.54 m; +1.0%, ES = 0.33, $p = 0.263$). No obstante, siete lanzadores de peso mejoraron la distancia obtenida en el lanzamiento hacia atrás con la ingesta de cafeína y nueve lanzadores de peso mejoraron la distancia obtenida en el lanzamiento de peso completo con respecto a las distancias obtenidas en el ensayo con placebo.

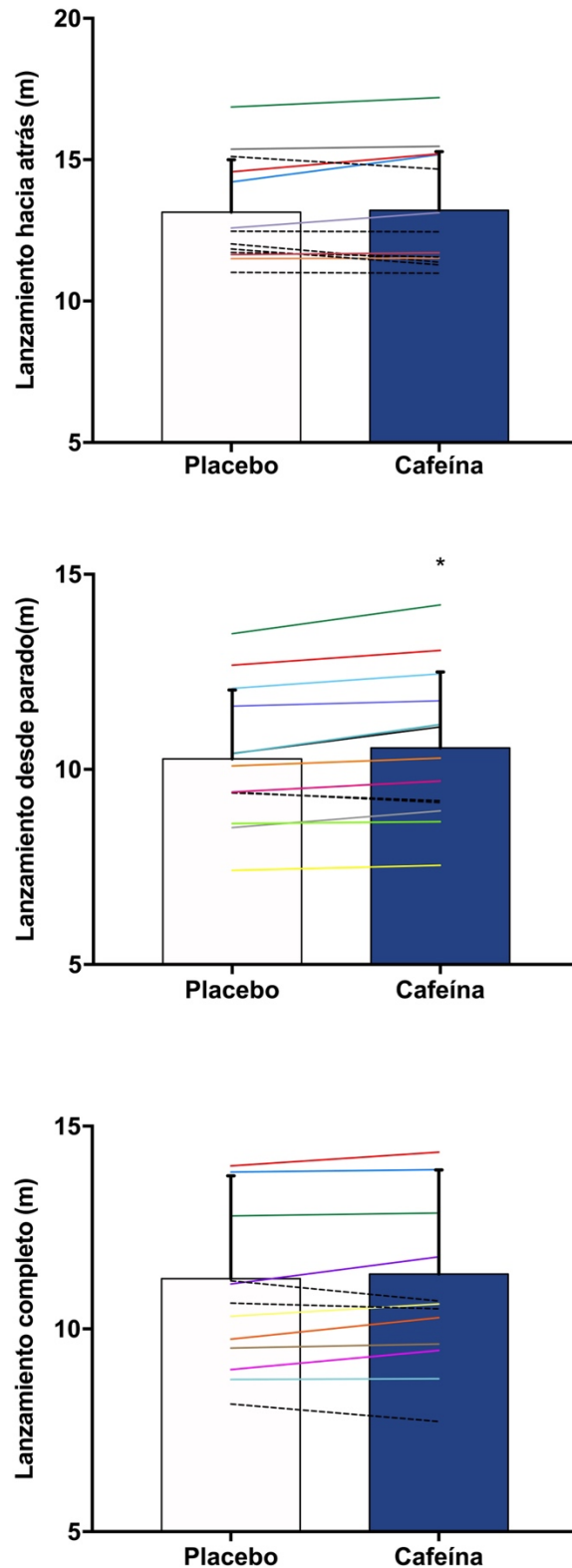


Figura 21. Respuestas individuales para la distancia (m) durante el lanzamiento tras la ingesta de 3 mg/kg de cafeína o de placebo. Cada línea representa a un individuo de una muestra de 13 individuos; las líneas continuas representan a los atletas que aumentaron la distancia con cafeína respecto al placebo y la línea discontinua a los atletas que disminuyeron la distancia con cafeína respecto al placebo. (*) Diferencias significativas entre cafeína y placebo para $p < 0.05$.

Los nulos fueron similares entre las condiciones, con 10 lanzamientos de peso juzgados como nulos con cafeína y 7 con el placebo ($p > 0.05$). La Tabla 8 muestra la prevalencia de efectos secundarios horas después de la ingesta de cafeína o placebo. No hubo diferencias entre las condiciones para ninguno de los efectos secundarios analizados. Seis de 13 atletas no acertaron el orden correcto de las condiciones placebo-cafeína (diferencias significativas entre la percepción y la ingesta real, Kappa de Cohen = 0.39; $p=0.047$; Índice de Bang = 0.23 y 0.54 para la condición cafeína y placebo, respectivamente), por lo que el diseño ciego se realizó con éxito. Por último, 10 atletas indicaron una mayor autopercepción de la potencia neuromuscular en la condición cafeína en comparación con la condición placebo (31.15%, $p = 0.051$).

Tabla 8. Prevalencia de efectos secundarios las horas posteriores a la ingesta de cafeína o placebo. Los datos muestran los porcentajes de respuestas afirmativas obtenidas de 10 atletas entrenados.

	Placebo %	Cafeína %	p
Nerviosismo	0	10	0.317
Molestias gastrointestinales	10	20	0.317
Activación	10	30	0.157
Irritabilidad	10	0	0.317
Dolor muscular	10	20	0.317
Dolor de cabeza	40	10	0.083
Diuresis	10	10	1.000

En los datos se muestran el % de respuestas afirmativas. () Diferencias significativas entre cafeína y placebo con $p < 0.05$.*

ESTUDIO 5. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA TOLERANCIA EN EL RENDIMIENTO NEUROMUSCULAR, EN LA CONCENTRACIÓN DE CAFEÍNA EN ORINA Y EN LOS EFECTOS SECUNDARIOS ASOCIADOS A UNA INGESTA MODERADA DE CAFEÍNA

5.1 Objetivos

Determinar la existencia y el curso temporal de la tolerancia a la cafeína en los efectos ergogénicos en el rendimiento neuromuscular, en las concentraciones de cafeína y paraxantina en orina, y en los posibles efectos adversos cuando se ingiere una ingesta moderada de cafeína (3mg/kg/día) durante de 22 días consecutivos.

5.2 Material y métodos

Participantes

Doce participantes activos y sanos se ofrecieron voluntarios para participar en esta investigación. Tenían una edad media \pm desviación estándar de 27.5 ± 7.6 años; una masa corporal de 66.8 ± 13.7 kg; una altura corporal de 172.7 ± 10.8 cm; un porcentaje de grasa corporal de $19.0 \pm 5.4\%$; una experiencia de entrenamiento de fuerza de 4.7 ± 3.0 años; una frecuencia de entrenamiento de 3.1 ± 1.2 sesiones/semana; y un consumo diario de cafeína de 0.9 ± 0.63 mg/kg/día. Todos los participantes cumplían los siguientes criterios de inclusión: a) edad entre 18 y 45 años; y b) más de 1 año de experiencia en entrenamiento de fuerza. Se excluyó a los participantes que declararon a) lesión en los dos últimos meses; b) consumo de medicamentos en el mes anterior; c) intolerancia a la cafeína; o d) uso de píldoras anticonceptivas orales, ya que pueden interferir con la farmacocinética de la cafeína¹⁷⁷. Se pidió a los participantes que se abstuvieran de cualquier forma de cafeína dietética y del uso de suplementos dietéticos durante la duración del estudio. Todos los participantes se familiarizaron con los procedimientos de prueba empleados en el presente experimento. Los participantes recibieron formularios de consentimiento informado antes de participar en la investigación, en los

que se les informaba de los procedimientos experimentales y de los riesgos. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Investigación de la Universidad Camilo José Cela y se realizó de acuerdo con la última versión de la Declaración de Helsinki (Anexo 2).

Diseño experimental

En esta investigación se utilizó un diseño experimental cruzado de medidas repetidas, doble ciego, controlado con placebo, aleatorizado y contrabalanceado. Cada participante tomó parte en dos protocolos idénticos y actuó así, como su propio control para producir un diseño en el que sólo la sustancia ingerida antes de la prueba difería entre los protocolos. En una de las condiciones, los participantes ingirieron diariamente una cápsula no identificable que contenía 3 mg de cafeína por kg de masa corporal (3 mg/kg; Bulk Powders, 100% de pureza, Reino Unido) durante 22 días consecutivos; en el otro protocolo, ingirieron una cápsula idéntica, pero rellena de un placebo (celulosa, Guinama, España) durante 22 días consecutivos. Las sustancias se ingirieron en cápsulas no identificables con 200 mL de agua 60 minutos antes del inicio de la prueba experimental. Dos días antes del inicio de cada protocolo de ingesta (día 0 = base), y tres veces por semana (i.e., los días 1, 4, 6, 8, 13, 15, 18, 20 y 22) dentro de cada tratamiento, los participantes acudían al laboratorio, donde se realizaba un protocolo compuesto por dos repeticiones máximas a diferentes porcentajes de cargas de la 1RM (30, 45, 60, 75 y 90% 1RM) del ejercicio de *press banca*. El día 1 siempre coincidía en viernes y el resto de protocolo se organizaba en lunes, miércoles y viernes. En el día 0 de cada tratamiento, no se ingirió ninguna cápsula antes del ejercicio, mientras que, en todos los días restantes excepto uno (día 11, día control), la medición del ejercicio comenzó siempre 60 minutos después de la ingesta de la cápsula asignada (Figura 22). En el caso del día intermedio del protocolo (día 11), el ejercicio de *press banca* se realizó antes -no después- de la ingesta de la cápsula con la intención de tener una situación de "control" en el punto medio de los tratamientos para determinar si la cafeína seguía siendo ergogénica en ese momento y para comprobar que no existía posible efecto del entrenamiento. No obstante, la cápsula con cafeína/placebo se ingirió el día 11 después de las mediciones para lograr 22 días de tratamiento consecutivo. El orden de los

protocolos de ingesta de 22 días fue aleatorio y ambos protocolos estuvieron separados por 11 días para permitir la eliminación completa de la cafeína. El cumplimiento de los tratamientos se examinó verbalmente a diario durante todo el experimento y no se registró ninguna incidencia durante todo el experimento. Las pruebas se realizaron a la misma hora del día y en un entorno de laboratorio con temperatura ambiente controlada ($\sim 21^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa ($\sim 32\%$).

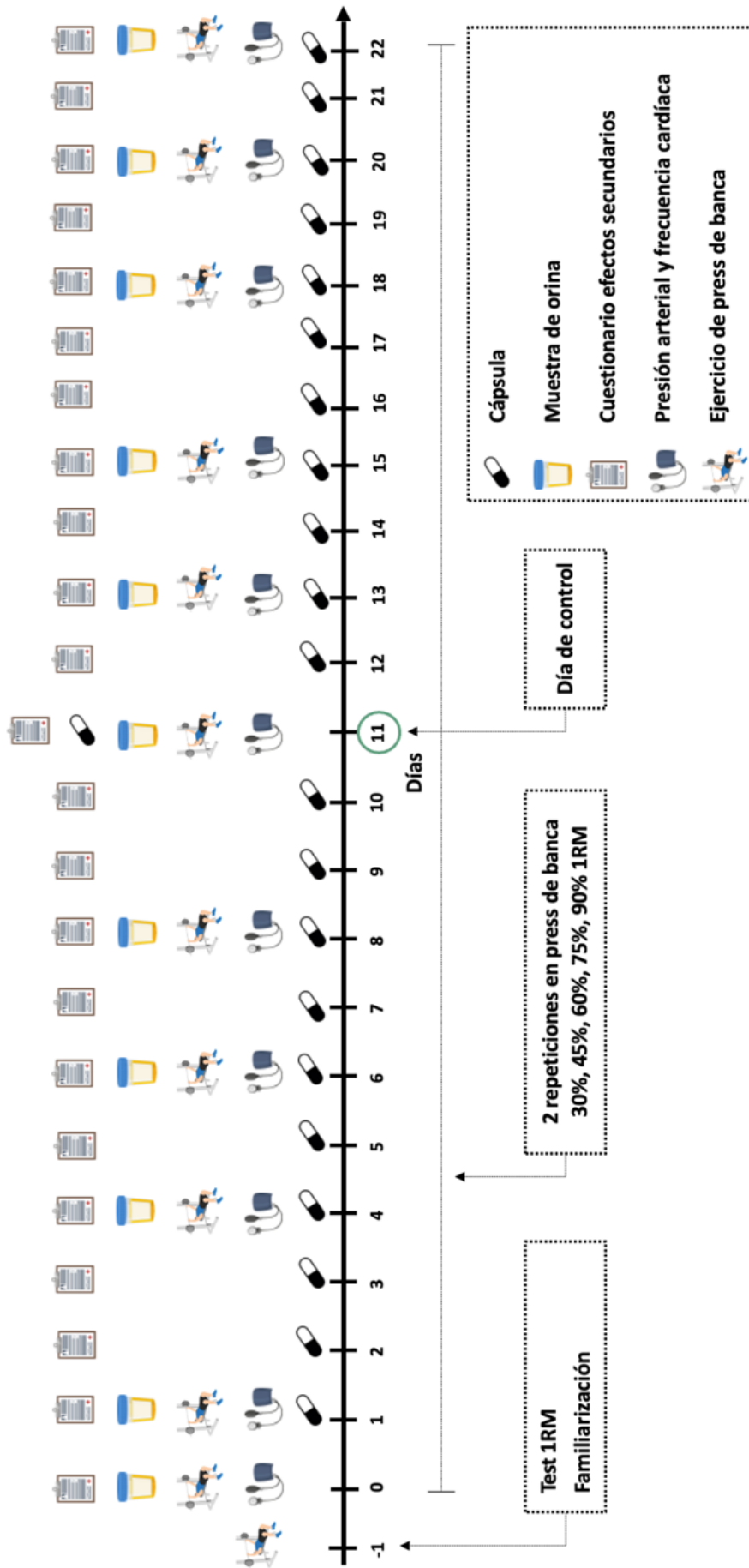


Figura 22. Diseño experimental de la investigación. Doce participantes se sometieron a un ejercicio de press banca incremental el día 0 (línea de base) y los días 1, 4, 6, 8, 11, 13, 15, 18, 20 y 22. Antes de cada sesión de entrenamiento (excepto el día 11, que se ingirió después), los participantes ingirieron una cápsula que contenía cafeína (3 mg/kg) o un placebo durante 22 días consecutivos en un orden aleatorio. //1RM: una repetición máxima.

Diseño pre-experimental

Durante el mes anterior al inicio del estudio, los participantes se abstuvieron de todas las fuentes de cafeína en la dieta para eliminar cualquier habituación a la cafeína. Se les aconsejó evitar cualquier ejercicio de fuerza o resistencia de la parte superior del cuerpo y dejaron de ingerir cafeína (café, té, chocolate, refrescos, bebidas energéticas, etc.) y otros estimulantes durante la investigación. Una semana antes de la primera prueba experimental, los participantes realizaron una sesión pre-experimental destinada a evaluar la 1RM en el ejercicio de *press banca* y a familiarizar a los participantes con el protocolo experimental. A su llegada, se pesó a los participantes sin ropa (± 50 g, Radwag, Polonia) para calcular correctamente la dosis de cafeína que les correspondería ingerir y posteriormente se evaluó el porcentaje de grasa corporal con bioimpedancia (modelo BC-418, Tanita, Japón). A continuación, los participantes rellenaron un Cuestionario de Frecuencia Alimentaria (FFQ) validado previamente²¹⁶ para evaluar la ingesta diaria de cafeína. Se utilizaron porciones para evaluar la cantidad de alimentos consumidos y para calcular con precisión el consumo de cafeína. La ingesta habitual de cafeína se estimó a partir de las respuestas proporcionadas al FFQ. Para las mediciones de la 1RM en el ejercicio de *press banca*, los participantes realizaron un calentamiento estandarizado de 15 minutos consistente en ejercicios de movilidad de las articulaciones de la parte superior del cuerpo seguidos de series de carga creciente estimada de cada participante entre el 20 y el 90% 1RM¹⁸¹. A continuación, se midió la 1RM de *press banca* con un máximo de cinco intentos permitidos y 5 min de recuperación entre intentos. La 1RM se identificó como el último levantamiento exitoso con una técnica correcta y este valor se utilizó para estandarizar la carga en los ensayos experimentales posteriores. Las pruebas se realizaron en una máquina Smith (Technogym, España) en la que dos guías verticales regulaban el movimiento de la barra. En cada intento, se monitorizó la velocidad de la barra en la fase concéntrica del movimiento con un encoder lineal y su software asociado (GymAware PowerTool, Kinetic Performance Technology, Australia) y se midió la velocidad media (m/s).

Procedimiento experimental

Los participantes fueron instruidos para cumplir las siguientes condiciones 24 h antes de cada ensayo experimental: a) evitar el ejercicio vigoroso, b) adoptar una dieta y una ingesta de bebidas similares, c) abstenerse del consumo de alcohol. El día 0 de las pruebas experimentales, los participantes llegaron al laboratorio por la mañana (entre las 9:00 y las 13:00 horas), habiendo pasado al menos ~3 horas tras la última ingesta sólida. Los participantes descansaron en posición supina durante 5 minutos y se midieron la frecuencia cardiaca en reposo y la presión arterial sistólica y diastólica (M6 Comfort, Omron, Japón). Posteriormente, los participantes realizaron un calentamiento estandarizado de 15 min consistente en ejercicios de la parte superior del cuerpo y ejecuciones del ejercicio de *press banca* a una velocidad progresiva con cargas submáximas. A continuación, realizaron dos repeticiones máximas con diferentes porcentajes de cargas 1RM (30, 45, 60, 75 y 90% 1RM) del ejercicio de *press banca* en máquina Smith (Technogym, España) (Figura 23). El descanso entre repeticiones se estandarizó para cada porcentaje de carga. Las cargas medias-bajas (30% a 60% 1RM) descansaron 1 min entre repeticiones, mientras que con la carga del 75% 1RM descansaron 2 min y con la carga del 90% 1RM descansaron 3 min. Al final de cada carga, se pidió a los participantes que respondieran sobre la percepción de la potencia neuromuscular en una escala de 1-10 puntos, y se informó previamente a los participantes de que 1 punto significaba una cantidad mínima y 10 puntos una cantidad máxima. Este cuestionario se ha utilizado previamente para evaluar la ergogenicidad percibida tras la ingesta de cafeína¹⁴⁰.



Figura 23. Participante realizando el ejercicio de *press banca* en máquina guiada. Imagen y vídeo propios (QR).

Tras las mediciones de *press banca*, se recogió una muestra de orina de cada participante en un recipiente estéril para el análisis de la concentración de cafeína y paraxantina. Tras esto, los investigadores centrifugaron la muestra de orina y la introdujeron en dos tubos de vidrio de 15 ml con tapón de rosca y formato anónimo (código alfanumérico) para su posterior congelación (Figura 24). Se llevó a cabo el análisis y detección de orina por espectrometría de masas [cromatografía líquida-espectrometría de masas (LC-MS/MS)] tal y como se describe en investigaciones anteriores²²⁰.



Figura 24. Imagen de las muestras de orina. Imágenes propias.

La misma noche y la mañana siguiente a cada visita al laboratorio, los participantes completaron una encuesta online para determinar si habían percibido algún efecto secundario asociado a la ingesta de la cápsula. En esta encuesta se preguntaba por el nerviosismo, la energía/activación, la irritabilidad, las molestias gastrointestinales, el dolor muscular, la diuresis y el dolor de cabeza de los participantes mediante una escala de sí/no. Además, se les pidió que valoraran la magnitud de los síntomas en una escala de 1 a 10 puntos. Asimismo, a la mañana siguiente, también rellenaron una encuesta similar en la que se preguntaba por el insomnio y la calidad del sueño. Estas encuestas se han utilizado anteriormente para evaluar la prevalencia de los efectos secundarios tras la ingesta de cafeína en estas variables ¹⁴⁰. Los participantes se familiarizaron con la encuesta antes de su aplicación en el estudio y se les informó de que 1 punto significaba la cantidad mínima de la variable/sensación y 10 puntos la cantidad máxima. Los participantes que no completaron estos cuestionarios a tiempo fueron eliminados del análisis.

El protocolo descrito anteriormente para el día 0 se repitió para cada día de medición durante los 22 días de tratamiento (i.e., los días 1, 4, 6, 8, 13, 15, 18, 20 y 22) pero con la administración de cafeína o placebo 60 min antes del inicio de la prueba de rendimiento. El día 11, los participantes ingirieron su cápsula asignada tras la finalización

de la prueba para producir un protocolo de ingesta continuada de 22 días. Once días después de la conclusión del primer protocolo de ingesta (placebo o cafeína), se llevó a cabo el protocolo restante imitando los procedimientos descritos anteriormente. La técnica de ejecución estandarizada y la retroalimentación fueron dadas a los participantes en todos los ensayos por el mismo investigador que no conocía los tratamientos. Las posiciones del banco y de las manos en la barra se obtuvieron en los ensayos de familiarización y se repitieron para cada individuo en todos los ensayos.

Análisis de datos

Los datos del estudio se introdujeron en el paquete estadístico SPSS (SPSS, v. 22.0, IBM SPSS Statistics, IBM Corporation, EE.UU.) y posteriormente se analizaron. Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para confirmar la normalidad de cada variable. Todas las variables presentaban una distribución normal y, en consecuencia, se utilizaron estadísticos paramétricos para determinar las diferencias entre los ensayos. Las diferencias entre los protocolos de cafeína frente a placebo se determinaron mediante un análisis de varianza de dos vías (sustancia \times día de ingestión) con medidas repetidas. Una vez obtenida una prueba F significativa para el efecto principal de la cafeína (corrección Greenhouse-Geisser), las diferencias en todas las comparaciones por pares cafeína-placebo se identificaron mediante pruebas *post hoc* LSD. Los días con ingestión de cápsulas y los días 0 y 11 se analizaron por separado. Además, se calcularon los tamaños del efecto (ES) mediante la *d* de Cohen (intervalos de confianza del \pm 95%) y se interpretaron de acuerdo con los siguientes umbrales: <0.2 trivial, $>0.2-0.6$ pequeño, $>0.6-1.2$ moderado, $>1.2-2.0$ grande y >2 muy grande. Los resultados se expresan como media \pm desviación estándar. En todas las pruebas estadísticas, el nivel de significación se fijó en $p < 0.05$.

5.3 Resultados

En el día 0 (sin ingesta de cápsula), la interacción condición \times día no fue significativa para ninguna variable de estudio ($p > 0.05$).

Presión arterial y frecuencia cardiaca

La Figura 25 muestra la variación de la frecuencia cardiaca y la presión arterial durante los 22 días de tratamiento con cafeína y placebo. La frecuencia cardiaca en reposo se mantuvo relativamente constante en ~62 ppm durante todo el estudio. De hecho, la ingestión de cafeína no afectó a la frecuencia cardiaca en reposo en ningún día (efecto principal, $F = 0.952$; $p = 0.448$; $\eta^2p = 0.096$) en comparación con la administración del placebo.

En cuanto a la presión arterial, la interacción condición \times día no fue significativa para la presión arterial diastólica y sistólica ($p > 0.05$ en ambos casos). Sin embargo, se identificó un efecto de la sustancia en la presión diastólica (efecto principal, $F = 12.24$; $p=0.006$; $\eta^2p = 0.55$) y en la presión sistólica (efecto principal, $F = 53.45$; $p < 0.001$; $\eta^2p=0.84$) cuando se compararon las condiciones (Figura 25, paneles B y C). En las pruebas *post hoc* no hubo ningún efecto significativo en la presión arterial en ninguna de las condiciones y días ($p > 0.05$).

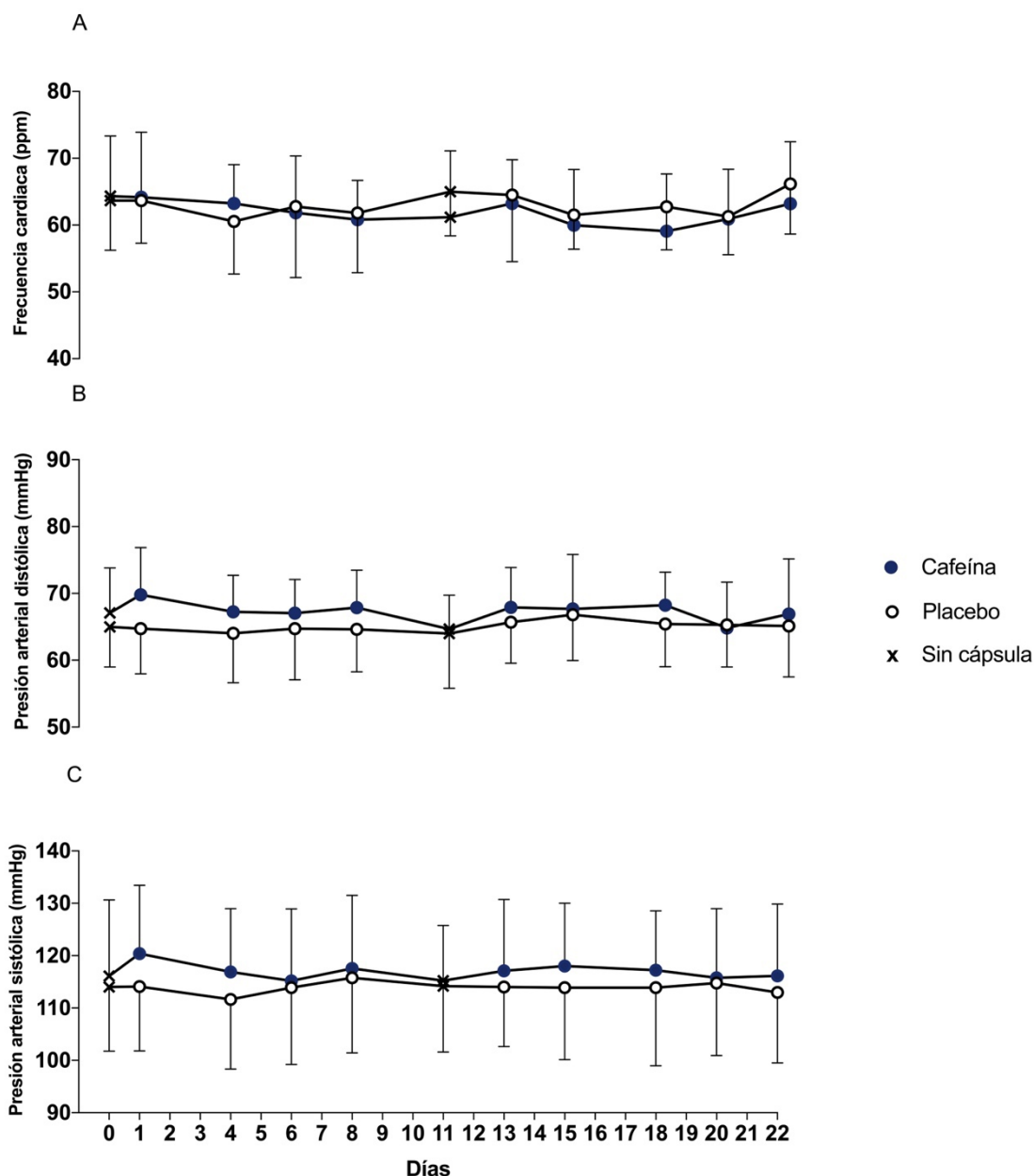


Figura 25. Frecuencia cardiaca en reposo (A), presión arterial diastólica (B) y presión arterial sistólica (C) tras la ingesta de 3 mg/kg/día de cafeína o un placebo durante 22 días consecutivos. (*) Diferencias entre placebo y 3 mg/kg para el mismo día ($p < 0.05$). (#) Diferencias respecto al día 1 dentro del mismo tratamiento, $p < 0.05$. Los datos se presentan como media \pm SD.

Velocidad media

La Figura 26 muestra el efecto de la cafeína sobre la velocidad media durante el ejercicio de *press banca*. En general, y en comparación con la condición con placebo, hubo un efecto principal de la cafeína para aumentar la velocidad media de la barra en todas las cargas ($p < 0.01$), excepto para el 75% y 90% 1RM ($p > 0.05$). En comparación con el placebo, la ingestión de cafeína aumentó la velocidad media para todas las cargas el

primer día del protocolo de cafeína ($p < 0.02$; ES = 0.82-1.73). El tamaño del efecto de la ingestión de cafeína para el día 1 fue moderado para el 30%, 75% y 90% 1RM y grande para el 45% y 60% 1RM (Figura 26). Además, no hubo efecto del entrenamiento, ya que no hubo diferencias en ninguna condición entre el día 0 y el día 11 cuando se ingirió cafeína y placebo después de la prueba ($p > 0.05$; ES= -0.16 – 0.35).

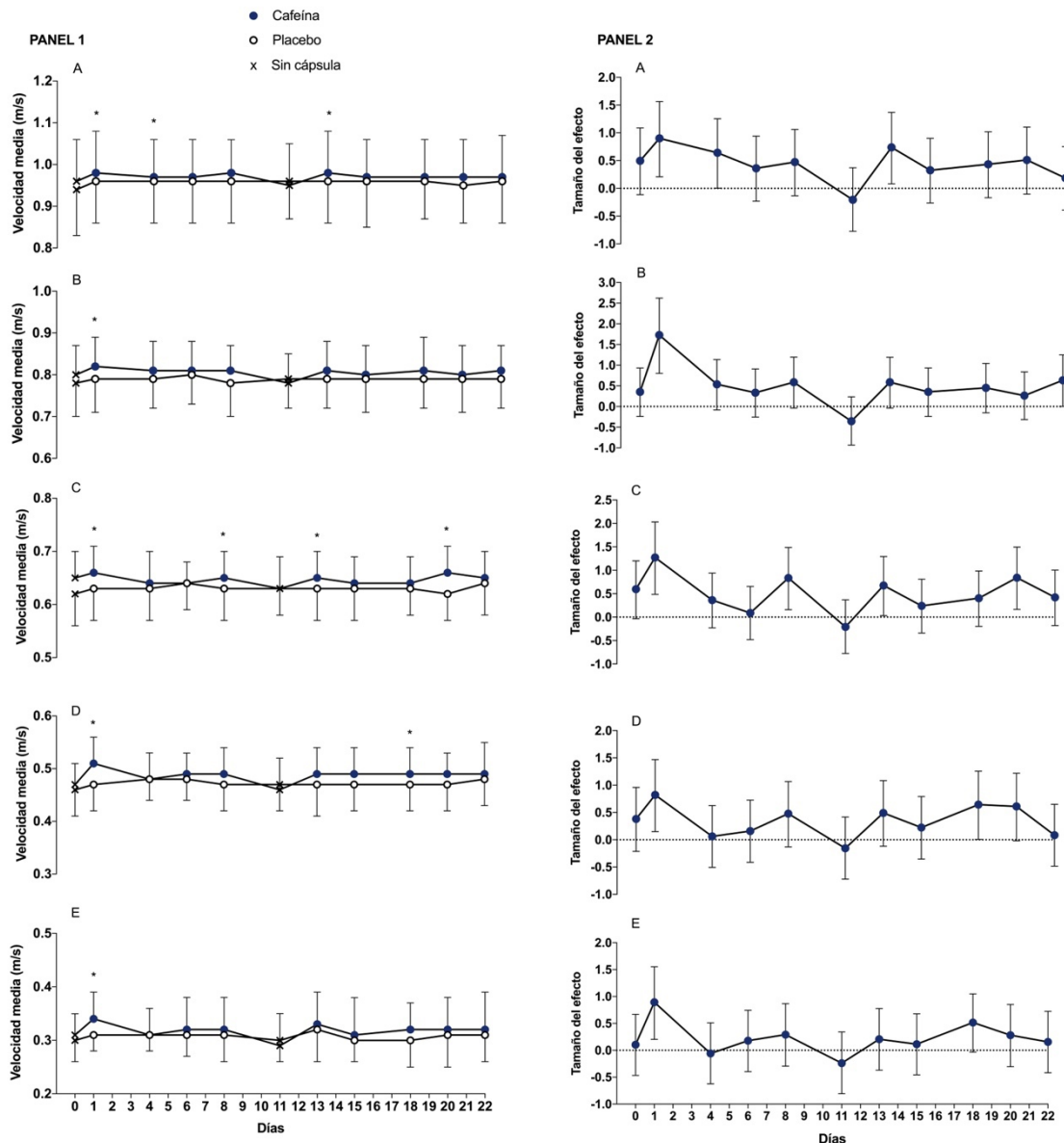


Figura 26. Velocidad media (m/s) obtenida durante un ejercicio de *press* banca tras la ingesta de 3 mg/kg/día de cafeína o placebo durante 22 días consecutivos. El panel 1 muestra los datos presentados como media \pm SD. (*) Cafeína diferente del placebo para el mismo día, $p < 0.05$. El panel 2 muestra el tamaño del efecto ($\pm 95\%$ intervalos de confianza) para todas las comparaciones por pares. A: 30% 1RM; B: 45% 1RM; C: 60% 1RM; D: 75% 1RM; y E: 90% 1RM. //1RM: una repetición máxima.

Fuerza percibida

En comparación con la condición placebo, hubo un efecto principal de la cafeína que aumentó la capacidad de fuerza percibida tras el ejercicio de *press banca* (Tabla 9; $F = 5.093$; $p < 0.05$; $\eta^2p = 0.316$), mientras que el tamaño del efecto de la cafeína fue trivial para el día 0 y pequeño para los días restantes. Sin embargo, no se produjo ninguna otra diferencia estadísticamente significativa en la comparación entre cafeína y placebo.

Tabla 9. Capacidad de fuerza percibida (escala de 1-10 puntos) tras la prueba de ejercicio de *press banca* con la administración de 3 mg/kg/día de cafeína o un placebo durante 22 días consecutivos.

Fuerza percibida						
Día	Placebo		Cafeína		p	Tamaño de efecto ($\pm 95\%$)
0 *	6.75	± 1.60	7.08	± 1.36	0.58	0.16 (-0.41 - 0.73)
1	7.00	± 1.82	7.88	± 1.13	0.20	0.40 (-0.20 - 0.98)
4	7.29	± 1.62	7.46	± 1.10	0.65	0.13 (-0.44 - 0.70)
6	7.63	± 1.38	7.13	± 1.71	0.32	-0.30 (-0.87 - 0.29)
8	7.21	± 1.84	7.71	± 1.23	0.19	0.40 (-0.20 - 0.98)
11 *	6.88	± 2.04	6.21	± 1.95	0.06	-0.75 (-1.38 - 0.09)
13	7.08	± 1.96	7.79	± 1.25	0.08	0.57 (-0.06 - 1.17)
15	7.42	± 1.68	7.67	± 1.54	0.49	0.20 (-0.37 - 0.77)
18	7.06	± 1.67	7.75	± 1.64	0.08	0.57 (-0.06 - 1.17)
20	6.71	± 1.91	7.40	± 1.75	0.09	0.54 (-0.08 - 1.14)
22	6.25	± 2.92	7.79	± 1.48	0.07	0.58 (-0.05 - 1.18)

* Los días 0 y 11 los participantes no consumieron ninguna sustancia previa a la prueba.

Concentración de orina

La Figura 27 representa la distribución de las muestras de orina según su concentración de cafeína y paraxantina, utilizando intervalos de 1 µg/mL. Los valores de concentración de cafeína (1.49 ± 1.72 vs. 0.85 ± 0.73 µg/mL; $p = 0.822$) y paraxantina (2.29 ± 1.21 vs. 2.04 ± 0.62 µg/mL; $p = 0.312$) fueron muy similares en el día 0 en las condiciones de placebo y cafeína. Hubo un efecto principal de la sustancia ($F = 75.22$; $p < 0.01$; $\eta^2p = 0.915$) y del día ($F = 2.25$; $p < 0.04$; $\eta^2p = 0.243$) sobre la concentración de cafeína en orina ($p < 0.05$). Además, la ingesta de cafeína en los días 1 y 4 aumentó significativamente la concentración de cafeína en orina en comparación con el día 22 ($p < 0.05$). También se observó un efecto principal de la sustancia ($F = 136.29$; $p < 0.01$; $\eta^2p = 0.951$) y del día ($F = 2.31$; $p < 0.03$; $\eta^2p = 0.248$) en la concentración de paraxantina en orina.

En comparación con el placebo, la ingestión diaria de cafeína aumentó la concentración de cafeína y paraxantina para los ensayos realizados dentro de los 22 días del protocolo (Panel A y B; $p < 0.05$), excepto para el día 11 en que la cafeína y el placebo se ingirieron después de la muestra.

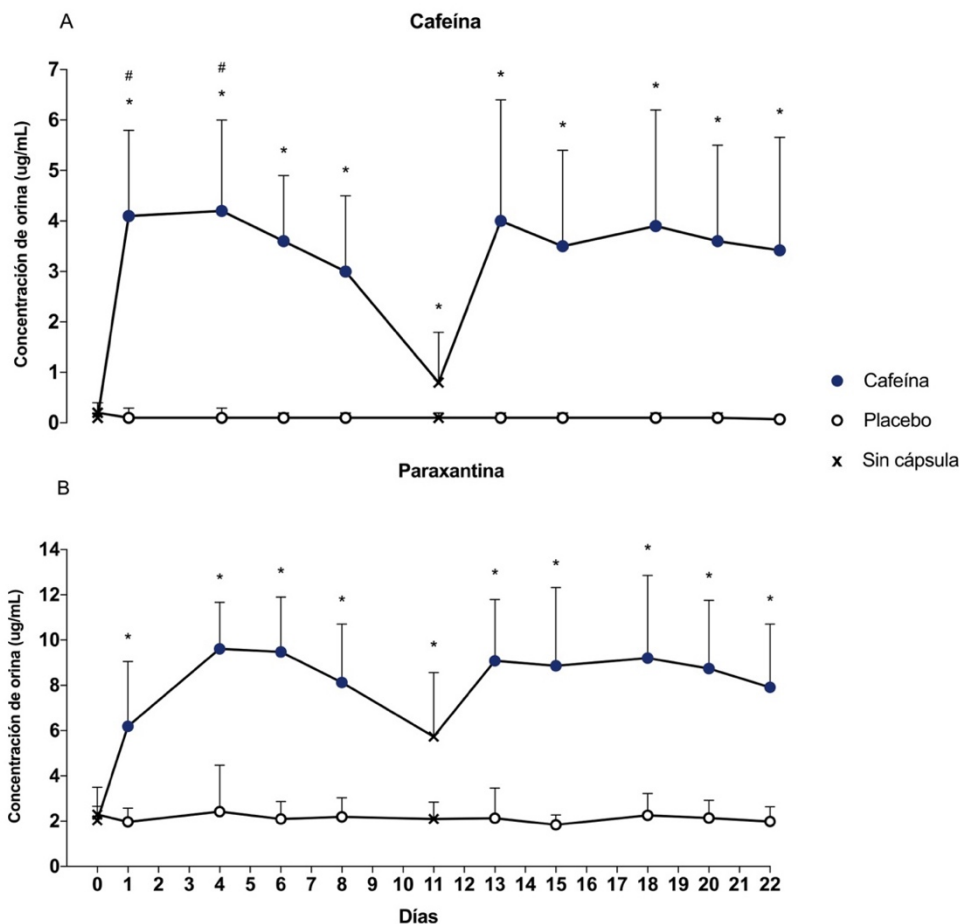


Figura 27. Concentraciones de cafeína (panel A) y paraxantina (panel B) en orina con la administración de 3 mg/kg/día de cafeína o un placebo durante 22 días consecutivos. (*) Diferencias entre placebo y 3 mg/kg para el mismo día, $p < 0.05$. (#) Diferencias respecto al día 1 dentro del mismo tratamiento, $p < 0.05$. Los datos se presentan como media \pm SD.

Efectos secundarios

La Tabla 10 muestra los valores de los efectos secundarios durante los 22 días de tratamiento con cafeína y placebo. Menos del 13% de los participantes declararon efectos secundarios en valores autocalificados en todas las variables presentadas, excepto en el nerviosismo y en la percepción de activación. El nerviosismo es el único que aumentó con la ingesta de cafeína respecto al placebo ($p = 0.034$) y en el que el 18% de los participantes declararon sentir nerviosismo cuando tomaban cafeína. El resto de las variables se mantuvieron estables en las dos condiciones ($p > 0.05$). A pesar de no haber efecto principal, el 25% de los participantes dijeron sentir energía/activación con la cafeína, mientras que sólo el 12% de los participantes dijeron sentir energía/activación con el placebo.

Tabla 10. Valores de efectos secundarios percibidos con la administración de 3 mg/kg/día de cafeína o un placebo durante 22 días

Día	Dolor de cabeza		Malestar gastrointestinal		Dolor muscular		Nerviosismo		Actividad/Energía		Irritabilidad		Diuresis		Insomnio		Calidad del sueño	
	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína	Placebo	Cafeína
1	1.3 ± 1.2	1.7 ± 1.2	1.0 ± 0.0	2.2 ± 2.8	1.6 ± 2.0	1.3 ± 1.2	2.1 ± 2.3	3.3 ± 2.6	2.3 ± 2.3	3.8 ± 2.8	1.4 ± 1.2	1.1 ± 0.3	2.0 ± 2.1	3.3 ± 3.1	1.9 ± 2.4	2.2 ± 2.5	7.5 ± 1.3	7.2 ± 1.4
4	1.0 ± 0.0	1.3 ± 0.9	1.8 ± 1.9	1.6 ± 1.2	1.0 ± 0.0	1.3 ± 0.9	1.1 ± 0.3	2.5 ± 2.1	2.2 ± 2.2	3.4 ± 2.6	1.3 ± 0.6	1.3 ± 0.9	1.4 ± 1.4	2.3 ± 1.9	1.5 ± 1.2	1.2 ± 0.4	7.4 ± 1.5	6.8 ± 1.5
6	1.1 ± 0.3	1.4 ± 1.2	1.0 ± 0.0	1.3 ± 0.9	1.0 ± 0.0	1.0 ± 0.0	2.8 ± 2.3	2.2 ± 2.0	1.9 ± 1.8	3.4 ± 2.9	1.8 ± 1.7	1.2 ± 0.6	1.4 ± 1.4	2.0 ± 1.9	1.3 ± 0.9	1.6 ± 2.0	7.3 ± 1.5	6.4 ± 2.2
8	1.4 ± 1.2	1.8 ± 1.9	1.0 ± 0.0	1.4 ± 1.2	1.0 ± 0.0	1.0 ± 0.0	1.4 ± 1.2	3.2 ± 2.5	1.5 ± 1.0	3.6 ± 3.1	1.0 ± 0.0	1.4 ± 1.4	1.8 ± 1.8	2.5 ± 2.2	2.2 ± 2.6	1.5 ± 1.2	7.9 ± 1.6	7.3 ± 1.6
11	1.0 ± 0.0	1.1 ± 0.3	1.0 ± 0.0	1.5 ± 1.5	1.3 ± 0.9	1.0 ± 0.0	1.7 ± 1.7	2.2 ± 2.0	1.4 ± 1.2	2.9 ± 2.7	1.0 ± 0.0	1.0 ± 0.0	1.3 ± 0.9	1.9 ± 1.3	2.5 ± 2.5	1.7 ± 1.6	6.8 ± 1.1	7.5 ± 1.2
13	1.4 ± 1.2	1.5 ± 1.8	1.8 ± 1.8	2.3 ± 2.2	1.0 ± 0.0	1.1 ± 0.3	1.6 ± 1.6	2.2 ± 1.9	1.9 ± 2.0	2.2 ± 1.7	1.1 ± 0.3	1.2 ± 0.6	1.2 ± 0.6	1.6 ± 1.1	2.0 ± 2.1	2.5 ± 1.8	6.8 ± 1.1	6.6 ± 1.6
15	1.3 ± 0.9	1.8 ± 1.8	1.4 ± 1.3	1.4 ± 1.4	1.0 ± 0.0	1.0 ± 0.0	1.4 ± 1.3	1.8 ± 1.4	2.1 ± 2.1	2.5 ± 2.3	1.0 ± 0.0	1.3 ± 0.9	1.8 ± 1.4	1.4 ± 1.0	1.3 ± 0.6	2.0 ± 2.0	7.6 ± 0.8	7.1 ± 1.8
18	2.0 ± 2.2	1.8 ± 1.8	1.4 ± 1.3	1.4 ± 1.2	1.1 ± 0.3	1.5 ± 1.7	1.3 ± 0.7	2.0 ± 1.7	1.7 ± 1.3	2.8 ± 2.1	1.4 ± 1.3	1.9 ± 1.8	1.1 ± 0.3	1.8 ± 2.0	1.2 ± 0.6	3.3 ± 3.0	7.3 ± 1.3	6.2 ± 2.6
20	1.0 ± 0.0	1.0 ± 0.0	1.5 ± 1.8	1.4 ± 1.4	1.3 ± 0.9	1.2 ± 0.6	1.6 ± 1.5	2.1 ± 1.9	1.8 ± 1.7	2.3 ± 2.1	1.2 ± 0.6	1.2 ± 0.6	1.5 ± 1.5	1.7 ± 2.3	1.0 ± 0.0	1.9 ± 1.6	7.7 ± 1.2	7.3 ± 1.6
22	1.5 ± 1.5	1.7 ± 2.3	1.1 ± 0.3	1.4 ± 1.4	1.1 ± 0.3	1.0 ± 0.0	1.4 ± 1.2	2.4 ± 2.4	1.8 ± 1.6	2.5 ± 2.5	1.5 ± 1.3	1.7 ± 1.6	1.4 ± 1.2	1.4 ± 1.4	1.5 ± 1.3	1.6 ± 1.5	7.6 ± 1.2	8.1 ± 1.3
ANOVA condición	F= 1.721 p= 0.216 η ² p= 0.135	F= 1.840 p= 0.202 η ² p= 0.143	F= 0.250 p= 0.627 η ² p= 0.022	F= 5.830 p= 0.034 η ² p= 0.346	F= 3.870 p= 0.075 η ² p= 0.260	F= 0.264 p= 0.618 η ² p= 0.023	F= 3.486 p= 0.089 η ² p= 0.241	F= 1.346 p= 0.279 η ² p= 0.144	F= 1.729 p= 0.221 η ² p= 0.161									

Cada efecto secundario fue autoinformado utilizando una escala de 1-10 unidades arbitrarias (u.a.). Se informó previamente a los participantes de que 1 significaba una cantidad mínima de ese elemento y 10 puntos significaba una cantidad máxima. (*) Diferencias entre placebo y 3 mg/kg para el mismo día ($p < 0.05$). (#) Diferencias respecto al día 1 dentro del mismo tratamiento, $p < 0.05$. Los datos se presentan como media ± SD.

7

DISCUSIÓN



7

DISCUSIÓN

A través de la presente Tesis Doctoral se ha estudiado la evolución en la investigación de los efectos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular, se ha evaluado el efecto ergogénico de la cafeína en diferentes variables de rendimiento de fuerza y potencia y se ha estudiado la potencial habituación del organismo hacia los efectos positivos y negativos de la ingesta repetida de cafeína. Los resultados de esta Tesis Doctoral ponen de manifiesto que el camino hasta la evidencia actual, que sostiene los beneficios de la cafeína para el rendimiento en pruebas que requieren altos niveles de fuerza, ha sido largo y sinuoso. Tras décadas con resultados contradictorios, la evidencia actual^{18,21}, en línea con las investigaciones experimentales que componen esta Tesis Doctoral, muestra un efecto ergogénico en lo que al ejercicio de fuerza respecta. Los resultados obtenidos coinciden con otras investigaciones en las que el uso de la cafeína mejora el rendimiento neuromuscular^{23,107}, por lo que se considera una estrategia efectiva y muy usada en el ámbito deportivo¹⁵. Sin embargo, la literatura existente carecía de estudios que aborden los efectos de ingestas continuadas, y cómo éstas pueden favorecer o perjudicar las adaptaciones producidas por el entrenamiento, así como la posible tolerancia a los efectos positivos o negativos de la ingesta de cafeína. Los resultados de la presente Tesis Doctoral son pioneros al evaluar el efecto potencial de la cafeína en los lanzamientos de peso, utilizados habitualmente durante el entrenamiento y la competición, acercando así la investigación a un contexto más ecológico. Además, estos resultados también son pioneros al demostrar que el uso de cafeína en el entrenamiento de fuerza consigue incrementar las mejoras producidas por un protocolo de entrenamiento de 4 semanas. De la misma forma, se ha evidenciado que una ingesta continuada de una dosis moderada de cafeína produce una tolerancia progresiva, debido a que los efectos de la cafeína fueron mayores el primer día de ingesta tanto en el rendimiento neuromuscular

como en los efectos adversos inducidos por su ingesta, y disminuyó progresivamente con la ingesta crónica de la sustancia. Por tanto, este análisis demuestra la oportunidad de esta Tesis Doctoral dada la escasa cantidad de estudios asociados a la investigación del efecto de la cafeína cuando se ingiere de manera prolongada y en contextos ecológicos como el entrenamiento de fuerza o en contextos deportivos. En los siguientes apartados, desarrollamos con mayor profundidad la discusión de los distintos resultados obtenidos en la presente Tesis Doctoral.

7.1

Evolución en la investigación sobre cafeína y deporte desde la perspectiva del rendimiento neuromuscular

El Estudio 1 nos indica un creciente interés en investigar el efecto de la cafeína sobre el rendimiento de fuerza en los últimos años, al menos en el número de estudios publicados. El uso de suplementos de cafeína para mejorar el rendimiento físico en humanos no es un campo de estudio nuevo. Aunque a finales del siglo XIX se llevaron a cabo algunas investigaciones para demostrar los beneficios de la cafeína en laboratorios alemanes¹⁶, podemos suponer que el inicio de la experimentación sobre la ergogenicidad de la cafeína en humanos se fijó a principios del siglo XX. Aunque los primeros trabajos utilizaron diseños experimentales adecuados con controles como el ejercicio previo, la hora del día o el uso de ensayos con placebo, se realizaron pocas investigaciones sobre la cafeína antes de la década de 1980, y el tamaño de las muestras era demasiado pequeño para establecer conclusiones sólidas. En consecuencia, el efecto de la ingesta oral de cafeína sobre el rendimiento neuromuscular se consideró poco estudiado, y sus efectos ergogénicos se rechazaron en la década de 1980^{62,63,98}. Además, la cafeína fue catalogada como sustancia prohibida en el deporte (prohibida únicamente en competición) por las autoridades antidopaje entre 1984 y 2004. Tal vez, la consideración de la cafeína como agente dopante llevó a una menor investigación sobre ésta y el rendimiento de fuerza. En las dos décadas en las que la cafeína se consideró una sustancia prohibida, sólo se publicaron nueve estudios sobre este tema. En 2004, fecha de la eliminación de la cafeína de la lista de sustancias prohibidas de la AMA, el número de publicaciones era escaso, quizás porque no había pruebas que apoyaran su uso. Curiosamente, en la primera década tras la retirada de la cafeína de la lista de sustancias prohibidas (2005-2015) se realizaron 58 estudios sobre su efecto en el rendimiento de fuerza. Este aumento del interés de la investigación sobre los

beneficios de la cafeína en la fuerza se vio acompañado por un aumento de su uso en deportes como la halterofilia, el judo y el boxeo, al menos a juzgar por las concentraciones urinarias tras la competición de atletas de estas disciplinas entre 2004 y 2015¹⁵. Tal vez, el hecho de que los efectos de la cafeína siguieran siendo contradictorios incluso con el aumento del interés de la investigación^{53,57,78} hizo que posteriormente aumentara exponencialmente el número de publicaciones sobre este tema.

La mayoría de las investigaciones sobre el efecto de la cafeína y la fuerza utilizaron experimentos controlados con placebo, que se realizaron en muestras de 20 o menos adultos jóvenes (de 18 a 35 años) con un cierto nivel de entrenamiento. Aunque existe una tendencia en los últimos años a un mayor interés por los beneficios potenciales de la cafeína en las mujeres, las investigaciones que analizan su efecto sobre la fuerza en esta población han sido escasas, de tal manera es así, que en la mayoría de los estudios (68.3%), no fueron incluidas. Así pues, las mujeres están infrarrepresentadas en la literatura sobre cafeína y rendimiento de fuerza. De 1907 a 2014, la presencia de mujeres se limita al 9.8%, pero incluso entre 2015 y 2022, es sólo el 22.9% del total de participantes. Este problema de la infrarrepresentación de las mujeres no es exclusivo de la investigación sobre la cafeína, ya que se ha descrito en otras áreas de las ciencias del deporte²²¹. Analizando las tres principales revistas de ciencias del deporte, Costello et al.²²¹ descubrieron que sólo el 39% de los participantes en los estudios publicados con muestras de seres humanos eran mujeres. Nuestros datos mostraban un efecto aún más sesgado y coincidían con investigaciones anteriores en el contexto de la cafeína en las ciencias del deporte³⁵. Salinero et al.³⁵ analizaron un total de 362 investigaciones originales sobre los efectos de la cafeína en el rendimiento físico. Sus resultados mostraron que 703 participantes eran mujeres de un total de 5321 individuos, lo que representaba sólo el 13.2% de la muestra total. En la misma línea, Grgic et al.¹⁸ en una revisión hallaron que, en todos los meta-análisis incluidos, el 72-100% de los participantes de la muestra agrupada eran hombres, lo que sugiere que deberían realizarse más estudios primarios entre mujeres para mejorar la generalizabilidad de los hallazgos científicos a la población de mujeres deportistas.

En base a los datos del Estudio 1, la mayoría de las investigaciones utilizaron cafeína aislada en cápsulas, y la dosis se ajusta a la masa corporal del participante (~5 mg/kg). Curiosamente, hasta 2015, sólo cuatro estudios emplearon diseños dosis-respuesta para establecer la asociación entre la cantidad de cafeína y la magnitud de su efecto ergogénico sobre la fuerza. En 1980, Bugyi et al.²²², comparó 167, 424 y 500 mg de cafeína, y en 1990¹⁹⁸, Jacobson y Edwards compararon 300 y 600 mg de cafeína. No fue hasta 2012 cuando se realizó el primer estudio dosis-respuesta con dosis ajustadas a la masa corporal del participante. Del Coso et al.²²³ compararon 1 y 3 mg/kg de cafeína, y un año después, Pallarés et al.⁹¹ compararon 3, 6 y 9 mg/kg de cafeína, ambos en protocolos de ejercicio de carga creciente. Desde entonces, 20 estudios han comparado dosis entre 1 y 12 mg/kg. Curiosamente, sólo los estudios con diseños de dosis-respuesta incluyeron dosis inferiores a 1.7 mg/kg y superiores a 7 mg/kg, lo que sugiere que estos estudios de dosis-respuesta son clave para comprender el efecto de dosis bajas/altas de cafeína sobre el rendimiento de fuerza. Incluso con la presencia de estos estudios, la identificación de la dosis que produce el mayor beneficio en el rendimiento es compleja, y tiene que ser ayudada por el estudio de los hallazgos de meta-análisis. Actualmente, existe un consenso para considerar que dosis moderadas (3-6 mg/kg) de cafeína son necesarias para mejorar el rendimiento de fuerza^{7,21,23,224} con un beneficio similar en términos de magnitud dentro de este rango. Las dosis superiores a 6 mg/kg también son ergogénicas para las variables relacionadas con la fuerza, pero la prevalencia de efectos secundarios aumenta paralelamente al aumento de dosis^{7,91,225}.

El estudio de las propiedades de la cafeína sobre la fuerza ha incluido otro tema de discrepancia a lo largo de los años: el uso de ejercicios localizados en músculos del tren superior frente a los del tren inferior. Hasta 2010, sólo 8 estudios (27.6% del total) habían empleado protocolos para evaluar la ergogenicidad de la cafeína en la fuerza de la parte superior del cuerpo, 16 (55.2%) evaluaron sus efectos en la parte inferior del cuerpo y 5 (17.2%) estudios habían estudiado los efectos de la cafeína tanto en el rendimiento de fuerza de la parte superior como inferior del cuerpo. En los últimos años, esta diferencia ha desaparecido, ya que la proporción de estudios que investigan la ergogenicidad de la cafeína en los ejercicios de fuerza de la parte inferior y superior del cuerpo es similar. Curiosamente, casi el 40% de los estudios más recientes incluían

mediciones tanto de la parte superior como de la inferior del cuerpo. Grgic et al.²³ informaron mediante una revisión sistemática y meta-análisis que la cafeína mejoraba significativamente la fuerza de la parte superior del cuerpo, pero no de la inferior. A pesar de diferencias, el Estudio 1 muestra una clara tendencia en cuanto al aumento de investigaciones que estudian los efectos de la cafeína en el rendimiento de la fuerza tanto en el ejercicio de la parte superior como inferior del cuerpo.

7.2

Ingesta aguda de cafeína y rendimiento neuromuscular

Dos de los estudios de la presente Tesis Doctoral analizaron el efecto de la ingesta aguda de 3 mg/kg de la cafeína en el rendimiento neuromuscular. En el Estudio 2 encontramos que la ingesta aguda de cafeína aumenta la velocidad, la fuerza y la potencia durante un entrenamiento de *press banca*. Como resultado, la cafeína aumentó el trabajo mecánico total realizado en el entrenamiento, lo que sugiere que la cafeína puede ser considerada como una ayuda ergogénica eficaz para aumentar el rendimiento neuromuscular durante una sesión de entrenamiento de fuerza basado en la velocidad en el ejercicio de *press banca*. A pesar de los resultados contradictorios de las primeras investigaciones sobre el efecto de la cafeína en el rendimiento del ejercicio de *press banca*²²⁶⁻²²⁸, las investigaciones más recientes han contribuido a establecer claramente los efectos ergogénicos de la cafeína en el rendimiento del *press banca*^{86,89,229,230}. Sin embargo, estos resultados son difíciles de aplicar a escenarios reales de entrenamiento de fuerza, ya que las evaluaciones utilizadas en estas investigaciones (e.g., 1 RM, curva de carga-velocidad y pruebas de fuerza-resistencia) rara vez se utilizan en entrenamientos destinados a obtener adaptaciones del entrenamiento de fuerza.

En base a los resultados obtenidos en el Estudio 2, la ingesta aguda de cafeína produjo un efecto ergogénico en casi todas las variables de rendimiento neuromuscular investigadas. Curiosamente, el efecto de la cafeína en las variables basadas en la velocidad y la potencia fue superior al efecto en las variables basadas en la fuerza. Debido al tempo de movimiento establecido para esta investigación (1/2/X/1), que incluía una pausa de 2 segundos antes de la fase concéntrica del ejercicio, los valores máximos de fuerza se alcanzaron en los primeros ~20 ms del movimiento. En cambio, los valores máximos de velocidad y potencia se obtuvieron en el 70-75% del tiempo total

bajo tensión, lo que indica que el efecto de la cafeína fue más pronunciado una vez acelerada la barra. Estos datos pueden indicar que la ingesta aguda de cafeína es más eficaz para producir mejoras relacionadas con la velocidad y la potencia inducidas por el entrenamiento de fuerza, aunque esta especulación requiere una exploración más profunda.

Por otro lado, el efecto ergogénico de la cafeína en el Estudio 4 no presenta unos resultados tan claros. Los principales hallazgos de esta investigación indican que la ingesta aguda de 3 mg/kg de cafeína aumentó el rendimiento en los saltos verticales (CMJ y SJ) y aumentó la distancia obtenida en lanzamiento de peso desde parado. Sin embargo, las mejoras con cafeína no alcanzaron significación estadística para la dinamometría de agarre de la mano, el rendimiento en *push-up* balístico y para las distancias obtenidas en el lanzamiento hacia atrás y el lanzamiento de peso completo. Existe un vacío en la literatura sobre los efectos de la cafeína en el rendimiento del lanzamiento de peso o en cualquier otra prueba de lanzamiento en atletismo. Sólo Bellar et al.²¹⁴ han investigado la ergogenicidad de una dosis baja de 100 mg de cafeína, pero esta fue inferior a las dosis mínimas efectivas de 3 mg/kg⁹² y la dosis de cafeína no estaba ajustada a la masa corporal del participante. Además, únicamente realizaron un lanzamiento desde parado, por lo que no refleja los efectos de la cafeína en el gesto deportivo completo, mucho más complejo técnicamente.

Curiosamente, en nuestro estudio la suplementación con cafeína fue eficaz para mejorar el rendimiento en el lanzamiento desde parado, pero el efecto de la cafeína en el lanzamiento de peso completo no alcanzó la significación estadística. La literatura previa sugiere que los cambios del 0.9 al 1.5% en la distancia obtenida durante el lanzamiento de peso, son mejoras con relevancia práctica en lanzadores de élite²³¹. En el presente estudio, el efecto de la cafeína en el lanzamiento de peso desde parado superó este umbral (+2.6% de la distancia obtenida con el placebo), mientras que la cafeína mejoró la distancia en el lanzamiento de peso completo en un 1.0%. Además, las mejoras en el rendimiento con cafeína fueron superiores al cambio mínimo detectable en el lanzamiento de peso desde parado (mejora media = 0.18 m frente a MDC = 0.10 m) y en el lanzamiento de peso completo (mejora media = 0.11 m frente a MDC = 0.09 m). Es

importante señalar que en los Juegos Olímpicos de 2020 celebrados en Tokio, la diferencia entre las medallas de oro y plata fue de 2.8/3.8% para hombres/mujeres, respectivamente y la diferencia entre las medallas de plata y bronce fue de 0.8/0.9%. En conjunto, toda esta información sugiere que la ingesta oral de cafeína produjo una mejora no estadísticamente significativa del 1% en la distancia obtenida en un lanzamiento de peso completo. Aunque este efecto fue de pequeña magnitud, puede representar una ventaja relevante para el rendimiento del lanzamiento de peso más allá de su significación estadística. Por tanto, los resultados de los Estudios 2 y 4 sugieren que una dosis de 3 mg/kg de cafeína es efectiva para mejorar varios aspectos del rendimiento neuromuscular en acciones simples como el press de banca y en acciones de fuerza compleja como el lanzamiento de peso.

7.3

Ingesta crónica de cafeína y su posible tolerancia

Los Estudios 3 y 5 de la presente Tesis Doctoral analizan el efecto que la ingesta crónica de 3mg/kg de cafeína previa al ejercicio de *press banca*. Concretamente, en el Estudio 3 se observó que esta ingesta no modificó las mejoras en 1RM obtenidas durante un programa de entrenamiento de fuerza en *press de banca* de 4 semanas. Sin embargo, la ingesta crónica de cafeína antes del ejercicio aumentó el número de adaptaciones inducidas por el entrenamiento en los valores medios y máximos tanto de velocidad como de potencia con respecto al placebo. Por otra parte, el Estudio 5 nos muestra que la velocidad media de la barra y la concentración de cafeína y paraxantina en orina alcanzó su punto máximo el primer día de ingesta y disminuyó después, por lo que hubo una tolerancia gradual a los efectos ergogénicos de la ingesta moderada de cafeína. Concretamente, en las variables neuromusculares, parece que las cargas medias-bajas (45 y 60% 1RM) fueron las que tuvieron mayor efecto con la ingesta de cafeína con respecto a la de placebo. Sin embargo, debe mencionarse que la cafeína todavía produjo una pequeña mejora en el rendimiento neuromuscular incluso después de 22 días consecutivos de ingesta.

De acuerdo con los efectos agudos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular (discutido en el apartado anterior), se ha sugerido que la cafeína podría ser también una ayuda ergogénica eficaz si se utiliza como una rutina de suplementación crónica para el entrenamiento^{232,233}. Sin embargo, ninguna investigación previa ha determinado los efectos de la ingesta crónica de cafeína sobre el rendimiento neuromuscular y sobre su tolerancia para confirmar esta hipótesis. Los resultados del Estudio 3 apuntan hacia la eficacia del uso de cafeína antes del ejercicio para mejorar las adaptaciones al entrenamiento. Sin embargo, a pesar de estos novedosos hallazgos, el programa de entrenamiento sólo duró 4 semanas y se necesitan más investigaciones con programas

de entrenamiento más largos, con diferentes ejercicios y con diferentes momentos para la ingesta de cafeína, para revelar si la cafeína puede ejercer efectos ergogénicos en otros programas de ejercicio de resistencia, en particular debido a la tolerancia potencial a la ergogenicidad de la cafeína inducida por la ingestión crónica¹³⁹. Las primeras investigaciones sobre la tolerancia a efectos ergogénicos de la cafeína se realizaron en roedores^{69,234}. Estas investigaciones sugerían que la capacidad de la cafeína para bloquear los receptores de adenosina A_1 y A_{2A} había aumentado la síntesis de nueva adenosina para compensar. Sin embargo, las pruebas de tolerancia a los efectos estimulantes de la cafeína en humanos no son concluyentes. Aunque existe la noción de que la ingesta habitual de cafeína puede influir en su capacidad ergogénica, hubo estudios que informaron de que consumidores bajos, moderados y altos de cafeína mostraron mejoras absolutas y relativas similares en el rendimiento contrarreloj en ciclismo²³⁵, en la prueba de CMJ y en una prueba de resistencia a la fuerza²³⁶ tras una suplementación aguda de 6 mg/kg. Sin embargo, en el estudio de Ruiz et al.²³⁷ mostraron que una ingesta diaria de 3 mg/kg/día de cafeína durante 20 días consecutivos aumentó la carga de trabajo en el segundo umbral ventilatorio (VT_2) en ciclismo durante los primeros 15 días de ingesta y mejoró el consumo de oxígeno (VO_2) en el VT_2 durante los primeros 4 días²³⁷. Además, también observaron beneficios de la cafeína en el rendimiento físico tras 20 días de ingesta continuada. Sin embargo, se comprobó que estos habían sido inferiores al efecto encontrado en el primer día de ingesta cuando los participantes no estaban habituados a la cafeína. En otra investigación¹³⁸, encontraron que había tolerancia progresiva en individuos que consumen 1.5-3.0 mg/kg/día de cafeína durante 28 días consecutivos, llegando incluso a suprimirse totalmente después de 28 días¹³⁸. Nuestros resultados concuerdan en parte con estas investigaciones^{138,139} que sugieren una tolerancia progresiva a los beneficios de la cafeína en el rendimiento neuromuscular cuando se ingiere de forma crónica. Sin embargo, es necesario analizar estas comparaciones con cautela debido a la metodología utilizada y a las variables mostradas, ya que esta es la primera investigación que analiza los efectos de tolerancia de la ingesta de cafeína en el rendimiento neuromuscular en el ejercicio del *press banca*. Asimismo, estos resultados presentan una curva similar a los presentados en la concentración de cafeína y paraxantina en orina. Así pues, parece que la respuesta física

a la cafeína podría relacionarse con los cambios en el metabolismo de la cafeína asociados a su ingesta crónica²²⁰.

En el contexto del deporte, se sabe que una ingesta aguda de 3 mg/kg de cafeína produjo una concentración de cafeína en orina de 4.1 µg/ml en jugadores de fútbol masculino³⁶ y de 2.4 µg/ml en jugadores de rugby masculino²³⁸. Curiosamente, el aumento de la dosis de cafeína no parece afectar a su concentración en orina. Un estudio reciente de Varillas-Delgado et al.²²⁰ investigó el efecto de una ingesta aguda de 3 mg/kg y 6 mg/kg de cafeína sobre la concentración urinaria de cafeína y paraxantina en mujeres. Observaron que la concentración urinaria de cafeína en las mujeres no cambiaba al comparar estas dos dosis. Sin embargo, la concentración de paraxantina en orina fue 1.8 veces mayor con 6 que con 3 mg/kg de cafeína. Los autores de esta investigación sugieren que la razón de sus hallazgos puede deberse a que la paraxantina es la variable urinaria que mejor identifica la ingesta de cafeína, ya que la mayor parte de la cafeína ingerida por vía oral se excreta como paraxantina urinaria. En la presente investigación, la evolución de la concentración de cafeína cambió a lo largo de los días. En comparación con el día 1 (4.14 ± 1.66 µg/mL), la concentración urinaria de cafeína se mantuvo estable hasta el día 4. Sin embargo, después de este día se redujo progresivamente, alcanzando una reducción del 27% el día 8 (3.02 ± 1.54 µg/mL). En las variables de rendimiento neuromuscular se observó que no hay tanta variabilidad en la velocidad media en el ejercicio de *press banca*. Esto sugiere que, a pesar de la reducción progresiva de la concentración de cafeína y paraxantina en orina, la cafeína seguía siendo ligeramente ergogénica tras 22 días de ingesta consecutiva. Esta tolerancia progresiva podría evitarse utilizando dosis superiores a la ingesta media diaria de cafeína²³⁹, aunque hay que recordar que el uso de dosis superiores también está asociado al incremento de la magnitud de los efectos secundarios. De forma que, los Estudios 3 y 5 indican que la ingesta crónica de cafeína combinada con un entrenamiento de fuerza incrementa las ganancias neuromusculares derivadas del entrenamiento. Sin embargo, existe una tolerancia al efecto ergogénico de la cafeína cuando se ingiere a diario, por lo que la recomendación sería utilizar la cafeína solo para aquellos entrenamientos de fuerza de alta intensidad.

7.4

Efectos secundarios asociados a la ingesta de cafeína

Cuando se analiza la evolución de las investigaciones de cafeína sobre el rendimiento de fuerza y su prevalencia en los efectos secundarios (Estudio 1), sólo una pequeña proporción de estudios han incluido la evaluación de la frecuencia o magnitud de los efectos secundarios típicos como variables de estudio (sólo 50 estudios, 26.5% del total), incluso en las investigaciones de los últimos años. Sin embargo, el estudio de los beneficios e inconvenientes de la cafeína en el contexto deportivo es clave para establecer la conveniencia de la suplementación con cafeína en deportistas. Sólo un estudio realizado en el siglo XX incluyó la medición de los efectos secundarios inducidos por la cafeína como objetivo de estudio, mientras que el interés por los efectos secundarios asociados a la suplementación con cafeína en el contexto deportivo ha cobrado mayor relevancia en los últimos años. La aparición y popularidad de las bebidas energéticas con cafeína en el mercado de los productos alimenticios relacionados con el deporte es una variable que puede haber provocado este aumento del interés en el estudio de los efectos secundarios, ya que este tipo de bebidas se han considerado perjudiciales en otros contextos, especialmente en individuos más jóvenes²⁴⁰. El uso intensivo que algunas poblaciones hacen de las bebidas y alimentos con cafeína (dentro y fuera del contexto deportivo), que lleva a la ingesta de altas dosis, puede sugerir la necesidad de vigilar los efectos secundarios de la suplementación con cafeína en el deportista, especialmente en aquellos que utilizan dosis superiores a 6 mg/kg.

En el Estudio 4, hemos analizado los efectos secundarios derivados de la ingesta aguda de 3 mg/kg de cafeína en lanzadores de peso, donde hemos observado que no aumentó la prevalencia de efectos secundarios como nerviosismo, problemas gastrointestinales, mayor activación, irritabilidad, dolor muscular, cefalea y diuresis, en comparación con

la ingesta de placebo (Tabla 8). Estos resultados concuerdan con revisiones sistemáticas que han establecido que dosis moderadas de cafeína (3 a 6 mg/kg), son dosis seguras y no presentan efectos secundarios graves, al menos para individuos sanos y activos²²⁵. Sin embargo, otros efectos de menor severidad, como dificultad para dormir, o una mayor activación sí se han reportado cuando se usa esta sustancia para mejorar el rendimiento deportivo¹⁴⁰, especialmente si se emplea en horas próximas la hora de dormir, por lo que debería ser un factor para tener en cuenta si se emplea de forma continuada o en escenarios deportivos donde la recuperación (i.e., descanso) es clave para la competición en una jornada sucesiva.

Al igual que con la ingesta aguda, la ingesta crónica de 3 mg/kg/día de cafeína durante 22 días consecutivos que se realizó en el Estudio 5 mantuvo estable a lo largo de toda la investigación las valoraciones de los efectos secundarios inducidos por la cafeína, excepto en el caso del nerviosismo, que presentó un efecto significativo entre condiciones (Estudio 5). A pesar de que la activación no presentó variaciones significativas, el 25% de los participantes informaron sentir mayor activación tras la ingesta de cafeína. En general, la baja presencia de estos efectos secundarios y la escasa relevancia clínica de estos inconvenientes sugieren que una dosis moderada de cafeína puede considerarse una sustancia segura. Sin embargo, los participantes deben ser conscientes de los posibles inconvenientes de la cafeína encontrados y pueden presentar cierta variabilidad interindividual¹⁴³.

Por otro lado, la ingesta de cafeína tiene el potencial de aumentar la presión arterial, aunque la magnitud del cambio suele ser pequeña y transitoria¹⁴³. Sin embargo, en algunos casos, los aumentos transitorios de la presión arterial pueden no ser perjudiciales. Por ejemplo, el aumento de la presión arterial con el ejercicio (que se asocia a una disminución del riesgo cardiovascular) suele ser sustancialmente mayor que el observado con la cafeína²⁴¹. Además, se sabe que la ingesta de hasta 400 mg/día de cafeína en adultos sanos no se asocia con efectos adversos sobre la frecuencia cardíaca¹⁴³. En el Estudio 5, la frecuencia cardíaca en reposo previa al ejercicio no se vio afectada por la ingesta crónica de 3 mg/kg/día durante ninguno de los 22 días consecutivos. Sin embargo, aumentó la presión arterial sistólica en 6.3 ± 7.1 mmHg

(+5.7%) y la presión arterial diastólica en 5.1 ± 7.4 mmHg (+ 8.4%) en el día 1 de ingesta de cafeína en comparación con el placebo. Este efecto de la cafeína sobre el aumento de la presión arterial sistólica y diastólica se mantuvo relativamente constante durante los 4 primeros días de ingesta consecutiva y luego se redujo progresivamente. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas en las que la ingesta crónica de cafeína en dosis moderadas se asocia con un incremento del $9.1 \pm 8.0\%$ en la presión arterial sistólica y del $7.6 \pm 10.0\%$ en la presión arterial diastólica en el día 1 de ingesta de cafeína¹⁴⁴. Curiosamente, estas variables también aumentaron el día 13 (tras el día de control) con la administración de cafeína, lo que podría confirmar que la cafeína no había producido tolerancia tras los 13 días de ingesta continuada.

8

LIMITACIONES DE LA TESIS DOCTORAL



8

LIMITACIONES DE LA TESIS DOCTORAL

La presente Tesis Doctoral tiene diferentes limitaciones que deberían ser discutidas:

- En todos los estudios experimentales se ha empleado una dosis moderada de cafeína (3 mg/kg) y, por lo tanto, no se puede determinar si existe un efecto dosis-respuesta. Sin embargo, dosis en torno a ~3 mg/kg parecen ser igual de ergogénicas en el rendimiento neuromuscular en comparación con dosis mayores (e.g., 6 mg/kg)⁸⁶⁻⁸⁹.
- En el Estudio 1, no se realizó una evaluación de las limitaciones metodológicas o del riesgo de sesgo de las investigaciones incluidas. Esto es algo habitual en las revisiones generales²⁴², y además esto escapaba de nuestros objetivos de estudio, pero futuras investigaciones podrían analizar cómo ha evolucionado el riesgo de sesgo en las investigaciones sobre las propiedades de la cafeína en el rendimiento de fuerza para seguir profundizando en este tema.
- Los estudios experimentales no incluyeron muestras de sangre, por lo que no pudimos determinar si la concentración sérica de cafeína era similar en todos los individuos, confirmando así el mecanismo principal que subyace a la ergogenicidad de la cafeína. Asimismo, limita la comprensión de los efectos de mejora en el rendimiento neuromuscular.
- Los estudios experimentales no incluyeron un análisis de las variaciones genéticas asociadas con el metabolismo de la cafeína (e.g., gen *CYP1A2*) y por tanto las variaciones individuales en la respuesta a la cafeína pudieron tener algún efecto en los resultados del estudio.
- La muestra de los estudios 2, 3 y 5 estaba compuesta por individuos con una experiencia moderada en el entrenamiento de fuerza, por lo que la traslación de

los resultados de estas investigaciones a atletas altamente entrenados en fuerza debe hacerse con precaución.

- En el Estudio 4, la técnica de los lanzamientos podría haber variado entre los dos días experimentales. Esto no pudo comprobarse científicamente ya que los lanzamientos no fueron grabados en vídeo. Sin embargo, al tratarse de lanzadores entrenados, creemos que esta variación sería mínima, y posiblemente propiciada por los efectos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular.
- El análisis de los efectos de la cafeína en el rendimiento neuromuscular se llevó a cabo principalmente en ejercicios del tren superior, como el *press banca* y en unas condiciones de cargas y repeticiones determinadas. Por lo tanto, es necesario ser cautelosos al trasladar estos resultados a otros escenarios (i.e., con diferentes números de series, repeticiones, cargas y ejercicios).
- Las variables presentadas en el Estudio 5 se recogieron 11 veces durante 22 días. Los resultados del curso temporal de la tolerancia podrían haber sido diferentes si se hubiera realizado otra distribución temporal, como por ejemplo la medición diaria del rendimiento neuromuscular.

9

CONCLUSIONES



9

CONCLUSIONES

- El interés por desarrollar investigaciones sobre el efecto de la cafeína en el rendimiento neuromuscular ha aumentado en los últimos años. Sin embargo, desde la década de 1980, no se han producido cambios relevantes en la metodología empleada. El patrón general se caracteriza por experimentos que incluían entre 11 y 15 adultos sanos, en donde hubo una mayor presencia de hombres que de mujeres. Aunque existe una tendencia a un mayor interés por los beneficios de la cafeína en las mujeres, la mayoría de los estudios (68,3%) no las incluyeron en su muestra. Los estudios utilizaron mayoritariamente una dosis única y moderada de cafeína ajustada a la masa corporal de los participantes (~ 5 mg/kg) en forma de cápsula, con un diseño experimental controlado con placebo, y analizando el efecto de la cafeína en la parte superior e inferior del cuerpo a través de distintos test.
- La ingesta previa al ejercicio de 3 mg/kg de cafeína fue una ayuda eficaz para mejorar la fuerza, la velocidad, la potencia y el trabajo durante una sesión de entrenamiento de *press banca*. Esta misma dosis aguda también aumentó el rendimiento físico de los lanzadores de peso durante test de salto (CMJ y SJ) y mejoró la distancia de lanzamiento desde parado. Estos resultados indican que la suplementación moderada de cafeína es efectiva durante el entrenamiento y durante la competición.

- Una suplementación crónica de 3 mg/kg/día de cafeína para el entrenamiento de *press banca* durante 4 semanas aumentó la velocidad y la potencia neuromuscular. Específicamente, la magnitud del cambio en las curvas velocidad y potencia fue mayor con cafeína que con placebo, mientras que la cafeína indujo estas mejoras en un rango más amplio de cargas. Sin embargo, esta suplementación no produjo una mejora en la 1RM. Así, la ingesta de cafeína en los días de entrenamiento parece aumentar el rendimiento neuromuscular en el ejercicio de *press banca* basado en la velocidad.
- La ingesta crónica de 3 mg/kg de cafeína durante 22 días aumentó la velocidad media de la barra en el ejercicio de *press banca* en el primer día de ingesta en todas las cargas, pero su efecto ergogénico disminuyó después. No obstante, en comparación con la condición placebo, no se observaron efectos significativos de la ingesta de cafeína en el 75% y en el 90% 1RM. Curiosamente, el tamaño del efecto siguió siendo pequeño al 30%, 45% y 60% 1RM después de 22 días de ingesta continuada, lo que sugiere que la cafeína seguía siendo ligeramente ergogénica para estas cargas.
- La ingesta crónica de 3 mg/kg de cafeína durante 22 días produjo un pico en la concentración de cafeína y paraxantina en orina el primer día de ingesta y disminuyó después, por lo que hubo una tolerancia gradual en el metabolismo de la cafeína. Los efectos secundarios y la presión arterial se mantuvieron estables a lo largo de toda la investigación, excepto en el caso del nerviosismo, que presentó un efecto entre condiciones. Asimismo, la presión arterial sistólica y diastólica aumentaron durante los 4 primeros días de ingesta consecutiva y luego se fue reduciendo progresivamente.

10

APLICACIONES PRÁCTICAS



10

APLICACIONES PRÁCTICAS

La presente Tesis Doctoral y la bibliografía sobre el efecto de la cafeína en el rendimiento neuromuscular previa a esta Tesis sugiere una serie de aplicaciones prácticas:

- La cafeína es una sustancia con efectos positivos (ergogénicos) y negativos (secundarios adversos). Por tanto, la suplementación con cafeína en el contexto deportivo o de entrenamiento de fuerza siempre debe hacerse teniendo en cuenta estos aspectos, y buscando una aplicación que maximice los efectos positivos mientras que reduzca los negativos.
- Cuando se plantee una suplementación de cafeína, la dosis debe estandarizarse en base al peso corporal del individuo. Además, la dosis óptima aconsejable es de 3mg/kg ya que tiene un efecto similar a dosis más altas minimizando los posibles efectos secundarios a su ingesta.
- La suplementación con cafeína tiene un amplio espectro de fuentes de administración, como cápsulas, geles, bebidas deportivas, chicles, geles o infusiones como el café o el té. Cada una de ellas puede tener la misma magnitud del efecto, siempre y cuando se iguale la dosis administrada. Desde el punto de vista funcional, calcular la dosis exacta de cada individuo es más sencilla a través de cápsulas que utilizando otras fuentes como el café o el té. Por tanto, en el sentido estricto del rendimiento neuromuscular, el uso de cápsulas puede ser más conveniente que el uso de bebidas con cafeína.
- La cafeína es absorbida rápidamente por el aparato digestivo y se mantiene relativamente estable en sangre durante 2-4 horas, por lo que debería tomarse entre 45 y 60 minutos antes del inicio del ejercicio físico, para asegurar que la

concentración de cafeína en sangre se encuentra en su pico máximo durante la actividad física o deportiva. Las actividades deportivas de fuerza que tienen una duración mayor de las 4 horas son poco frecuentes, por lo que el uso de una única ingesta aguda antes del ejercicio sería suficiente.

- La ingesta aguda de 3 mg/kg de cafeína incrementa el rendimiento en diferentes disciplinas deportivas basadas en la fuerza y la potencia. Particularmente, en el rendimiento neuromuscular tiene un potencial efecto ergogénico en ejercicios basados en la velocidad y en la fuerza muscular, así como en los lanzamientos y en los saltos. Tanto las personas que entrenen fuerza como los atletas que compiten en deportes basados en la fuerza podrían usar la cafeína para aumentar su rendimiento. A este respecto habría que aplicar los apartados descritos anteriormente respecto de conveniencia en el uso, dosis, tipo y *timing* para la suplementación con cafeína.
- La ingesta de cafeína como “*pre-entreno*” parece ser una ayuda ergogénica eficaz para aumentar el número de adaptaciones inducidas por el entrenamiento en los valores medios y máximos tanto de velocidad como de potencia. Los profesionales de las ciencias del deporte y los nutricionistas podrían incorporar el uso de la cafeína en los entrenamientos de sus atletas, pero teniendo en cuenta los posibles inconvenientes de la suplementación con cafeína, como su consumo excesivo y su posible tolerancia.
- La ingesta diaria de cafeína produce una tolerancia progresiva y una disminución de los efectos ergogénicos de esta sustancia en el rendimiento. A causa de esto, debería evitarse el uso de cafeína a diario; la cafeína debería consumirse ocasionalmente solo en los entrenamientos de mayor intensidad o más relevantes y antes de las competiciones, incrementando así su efecto y reduciendo su dependencia. Aunque el uso de dosis mayores de cafeína podría ser una estrategia para compensar la tolerancia a esta sustancia, esto implicaría ingerir cada vez dosis mayores con el consiguiente aumento de los efectos secundarios.
- Por último, el uso de la cafeína debería estar supervisado por profesionales cualificados y los deportistas deberían estar informados de los beneficios y de los inconvenientes que puede producir dicha sustancia.

11

CONFLICTO DE INTERÉS



11

CONFLICTO DE INTERÉS

La realización de las investigaciones se llevó a cabo sin ningún tipo de apoyo por parte de empresas deportivas y/o suplementos deportivos con cafeína. No existen relaciones personales o comerciales que puedan haber influido en el trabajo presentado.

Algunas de las investigaciones que componen esta Tesis Doctoral fueron financiadas por parte del Vicerrectorado de Investigación y Ciencia, de la Universidad Camilo José Cela.

- Los Estudios 2, 3 y 4 formaron parte del proyecto de investigación *“TRAININGCAF”*
- El Estudio 5 formó parte del proyecto de investigación *“TOLERCAF”*.

Durante el periodo de realización de la presente Tesis Doctoral he disfrutado de las siguientes becas pre-doctorales:

- Ayuda para la contratación de investigadores predoctorales y posdoctorales a través del Programa Operativo de Empleo Juvenil y la iniciativa de Empleo Juvenil (YEI). Comunidad de Madrid I+D+I. Fondos de investigación europeos.
- Ayuda para la contratación de investigadores predoctorales a través de la Universidad Camilo José Cela en colaboración con el Banco Santander. Becas predoctorales I+D.

Enhancing Physical Performance in Elite Junior Tennis Players With a Caffeinated Energy Drink

César Gallo-Salazar, Francisco Areces, Javier Ablán-Vicén, Beatriz Lara, Juan José Salinero, Cristina Gonzalez-Millán, Javier Portillo, Víctor Muñoz, Daniel Juárez, and Juan Del Coso

The aim of this study was to investigate the effectiveness of a caffeinated energy drink in elite junior tennis players. In 2 different sessions separated by 1 wk, 14 participants performed a handgrip-strength test, a simulated singles match (best of 3 sets) (GPS devices). Furthermore, the ingestion of the energy drink was compared at baseline and after 60 min.

Open Access
 CrossMark

Wake up and smell the coffee: caffeine supplementation and exercise performance: umbrella review of 21 published meta-analyses

Jožo Grgič,¹ Ivana Grgič,² Craig Pickering,^{3,4} Brad J Schoenfeld,⁵ and Jelko Pedisic¹

OBJECTIVE: To systematically review, summarise and synthesise findings of published meta-analyses that investigated the effects of caffeine on exercise performance. **DESIGN:** Umbrella review. **SOURCES:** Twelve databases. **ELIGIBILITY CRITERIA FOR SELECTING STUDIES:** Studies that examined the effect of caffeine on exercise performance. **RESULTS:** Caffeine supplementation significantly improved exercise performance in all studies. The effect size was moderate to large. **CONCLUSION:** Caffeine supplementation significantly improves exercise performance. **KEYWORDS:** caffeine, exercise performance, meta-analysis, umbrella review.

Effects of caffeine intake on muscle strength and power: a systematic review and meta-analysis

Trexler^{2,3}, Bruno Lazinica⁴ and Jelko Pedisic¹

Caffeine is an ergogenic aid. Literature about the effect of this systematic review and meta-analysis on muscle strength and power. The aim of this systematic review and meta-analysis was to find studies on the effect of caffeine intake on muscle strength and power.

12 BIBLIOGRAFÍA

International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance

Nanci S. Guest^{1*}, Trisha A. VanDusseldorp², Michael T. Nelson³, Jožo Grgič⁴, Brad J. Schoenfeld⁵, Nathaniel D. M. Jenkins⁶, Shawn M. Arnt⁷, Jose Antonio⁸, Jeffrey R. Stout¹⁰, Eric T. Treder¹¹, Abbie E. Smith-Ryan¹², Erica R. Goldstein¹³, Douglas S. Kolman^{13,14} and Bill L. Campbell¹⁵

Abstract: A critical evaluation of the available literature to date. The International Society of Sports Nutrition (ISSN) position stand on caffeine intake is as follows: Caffeine supplementation with caffeine has been shown to acutely enhance various aspects of exercise performance. Small to moderate benefits of caffeine use include, but are not limited to, increased strength, sprinting, jumping, and throwing performance. Caffeine supplementation may also enhance aerobic performance and muscular strength. The form of caffeine (solid or liquid) and the dose of caffeine may influence the magnitude of its effects. The form of caffeine (solid or liquid) and the dose of caffeine may influence the magnitude of its effects. The form of caffeine (solid or liquid) and the dose of caffeine may influence the magnitude of its effects. The form of caffeine (solid or liquid) and the dose of caffeine may influence the magnitude of its effects.

Time course of tolerance to the benefits of caffeine

Beatriz Lara, Carlos Ruiz-Moreno, Juan José Salinero, Juan Del Coso

Abstract: The ergogenic effect of acute caffeine ingestion on performance is dependent on the amount of caffeine ingested on a day-to-day basis. The aim of this study was to determine the time course of tolerance to the benefits of caffeine in healthy active individuals. The ergogenic effect of acute caffeine ingestion on performance is dependent on the amount of caffeine ingested on a day-to-day basis. The aim of this study was to determine the time course of tolerance to the benefits of caffeine in healthy active individuals.

The use of energy drinks in sport: perceived ergogenicity in male and female athletes

Juan J. Salinero, Beatriz Lara, Javier Abian-Vicén, Cristina Gonzalez-Millán, Francisco Gallo-Salazar, Diana Ruiz-Vicente and Juan Del Coso*

Abstract: The use of caffeine containing energy drinks has dramatically increased in the last few years, especially in the sport context. The aim of the present study was to assess psycho-physiological changes and prevalence of side effects resulting from the ingestion of low to moderate doses of caffeinated energy drinks (60-120 mg caffeine/kg body mass) in the form of an energy drink. The aim of the present study was to assess psycho-physiological changes and prevalence of side effects resulting from the ingestion of low to moderate doses of caffeinated energy drinks (60-120 mg caffeine/kg body mass) in the form of an energy drink.

Effects of Caffeine Ingestion on Physical Performance in Women Handball Players: A Randomized, Controlled Trial

Alejandro Muñoz, Álvaro López-Samanes, Alberto Pérez-López, Berta Moreno-Herederó, Jesús Rivilla-García, Pablo González-Fernández, Esther Morencos, and Juan Del Coso

Objective: To investigate the effects of acute caffeine (CAFF) intake on physical performance in elite women handball players. **Methods:** A total of 15 elite women handball players participated in a randomized, controlled trial. Participants ingested either a placebo (cellulose) or 3 mg of CAFF per kilogram of body mass. The aim of this study was to investigate the effects of acute caffeine (CAFF) intake on physical performance in elite women handball players. Participants ingested either a placebo (cellulose) or 3 mg of CAFF per kilogram of body mass.

British Journal of Nutrition

Key words: Energy drinks; Side effects; Ergogenic effects; Sport; Sex differences

Caffeine (1,3,7-trimethylxanthine) is a natural alkaloid present in varying quantities in the leaves, fruits and seeds of various plants (coffee, kola, tea, maté, etc.). Furthermore, caffeine can be artificially synthesised in the laboratory and is frequently included in over-the-counter medications, nutritional supplements and commercially available beverages.⁽¹⁾ Caffeine is the most frequently consumed psychoactive drug in the current society, despite this substance having no nutritional value and not being essential for any physiological process.⁽²⁾ However, caffeine is a potent stimulant of the central nervous system and is primarily used for increasing vigour and alertness, warding off drowsiness and restoring alertness. In the sport setting, caffeine is also the most consumed substance⁽³⁾ because of its effectiveness to improve performance in a wide variety of sport disciplines.⁽⁴⁾ The amount of caffeine consumed per day varies between 100 and 300 mg, such as the source of intake, and the individual's tolerance to caffeine. Caffeine consumers to the mood- and performance-enhancing effects of caffeine is related to their levels of habitual intake.⁽⁵⁾ A greater and longer-lasting ergogenic effect has been found for non-consumers than for caffeine consumers after a dose of 3 mg caffeine/kg.⁽⁶⁾ Furthermore, genetic differences influence the response to caffeine, especially in cytochrome P-450 enzymes, and by variation in the role in the effects of caffeine. The main effect of caffeine is to increase the release of catecholamines from the adrenal medulla.

12

BIBLIOGRAFÍA

1. Magkos, F. & Kavouras, S. A. Caffeine use in sports, pharmacokinetics in man, and cellular mechanisms of action. *Crit Rev Food Sci Nutr* **45**, 535–562 (2005).
2. Fulgoni, V. L., Keast, D. R. & Lieberman, H. R. Trends in intake and sources of caffeine in the diets of US adults: 2001-2010. *Am J Clin Nutr* **101**, 1081–1087 (2015).
3. US Department of Agriculture ARS. What We Eat In America (WWEIA) Database | Ag Data Commons. *US Department of Agriculture* <https://data.nal.usda.gov/dataset/what-we-eat-america-wweia-database> (2012).
4. Rybak, M. E., Sternberg, M. R., Pao, C. I., Ahluwalia, N. & Pfeiffer, C. M. Urine excretion of caffeine and select caffeine metabolites is common in the U.S. population and associated with caffeine intake. *J Nutr* **145**, 766–774 (2015).
5. Bailey, R. L., Saldanha, L. G., Gahche, J. J. & Dwyer, J. T. Estimating caffeine intake from energy drinks and dietary supplements in the United States. *Nutr Rev* **72 Suppl 1**, 9–13 (2014).
6. Reyes, C. M. & Cornelis, M. C. Caffeine in the Diet: Country-Level Consumption and Guidelines. *Nutrients* **10**, (2018).
7. Guest, N. *et al.* International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance. *Journal of the International Society of Sports Nutrition* vol. 18 Preprint at <https://doi.org/10.1186/s12970-020-00383-4> (2021).
8. Maughan, R. J., Shirreffs, S. M. & Vernec, A. Making Decisions About Supplement Use. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* **28**, 212–219 (2018).
9. Mary Burke, L. C. M. R. C. G. C. R. D. B. F. L. M. M. S. N. & W. Olivia. Supplements and Sports Foods. in *Clinical Sports Nutrition* (Clinical Sports Nutrition, 2006).
10. Higgins, S., Straight, C. R. & Lewis, R. D. The Effects of Preexercise Caffeinated Coffee Ingestion on Endurance Performance: An Evidence-Based Review. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* **26**, 221–239 (2016).
11. Ganio, M. S., Klau, J. F., Casa, D. J., Armstrong, L. E. & Maresh, C. M. Effect of caffeine on sport-specific endurance performance: a systematic review. *J Strength Cond Res* **23**, 315–324 (2009).
12. Doherty, M. & Smith, P. M. Effects of caffeine ingestion on rating of perceived exertion during and after exercise: a meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports* **15**, 69–78 (2005).

13. Van Thuyne, W. & Delbeke, F. T. Distribution of caffeine levels in urine in different sports in relation to doping control before and after the removal of caffeine from the WADA doping list. *Int J Sports Med* **27**, 745–750 (2006).
14. World Anti-Doping Agency. Monitoring program. Preprint at <https://www.wada-ama.org/en/> (2023).
15. Aguilar-Navarro, M. *et al.* Urine Caffeine Concentration in Doping Control Samples from 2004 to 2015. *Nutrients* **11**, 286 (2019).
16. Weiss, B. & Laties, V. G. Enhancement of human performance by caffeine and the amphetamines. *Pharmacol Rev* **14**, 1–36 (1962).
17. Rivers, W. H. & Webber, H. N. The action of caffeine on the capacity for muscular work. *J Physiol* **36**, 33–47 (1907).
18. Grgic, J. *et al.* Wake up and smell the coffee: caffeine supplementation and exercise performance—an umbrella review of 21 published meta-analyses. *Br J Sports Med* **54**, 681–688 (2020).
19. Baltazar-Martins, J. G., de Souza, D., Aguilar, M., Grgic, J. & Del Coso, J. Infographic. The road to the ergogenic effect of caffeine on exercise performance. *Br J Sports Med* **54**, 618–619 (2020).
20. Salinero, J. J., Lara, B. & Del Coso, J. Effects of acute ingestion of caffeine on team sports performance: a systematic review and meta-analysis. *Res Sports Med* **27**, 238–256 (2019).
21. Grgic, J. Effects of Caffeine on Resistance Exercise: A Review of Recent Research. *Sports Medicine* **51**, 2281–2298 (2021).
22. Polito, M. D., Souza, D. B., Casonatto, J. & Farinatti, P. Acute effect of caffeine consumption on isotonic muscular strength and endurance: A systematic review and meta-analysis. *Sci Sports* **31**, 119–128 (2016).
23. Grgic, J., Trexler, E. T., Lazinica, B. & Pedisic, Z. Effects of caffeine intake on muscle strength and power: a systematic review and meta-analysis. *J Int Soc Sports Nutr* **15**, (2018).
24. Grgic, J. & Mikulic, P. Effects of caffeine on rate of force development: A meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports* **32**, 644–653 (2022).
25. Grgic, J. & Varovic, D. Moderators of Caffeine’s Effects on Jumping Performance in Females: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of the American Nutrition Association* (2023) doi:10.1080/27697061.2023.2212740.
26. López-Torres, O., Rodríguez-Longobardo, C., Capel-Escoriza, R. & Fernández-Elías, V. E. Ergogenic Aids to Improve Physical Performance in Female Athletes: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Nutrients* **15**, (2022).
27. Gonçalves Ribeiro, B. *et al.* Acute effects of caffeine intake on athletic performance: A systematic review and meta-analysis. *Revista chilena de nutrición* **44**, 283–291 (2017).
28. Doherty, M. & Smith, P. M. Effects of caffeine ingestion on exercise testing: a meta-analysis. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* **14**, 626–646 (2004).
29. Christensen, P. M., Shirai, Y., Ritz, C. & Nordsborg, N. B. Caffeine and Bicarbonate for Speed. A Meta-Analysis of Legal Supplements Potential for Improving Intense Endurance Exercise Performance. *Front Physiol* **8**, (2017).
30. Shen, J. G., Brooks, M. B., Cincotta, J. & Manjourides, J. D. Establishing a relationship between the effect of caffeine and duration of endurance athletic

- time trial events: A systematic review and meta-analysis. *J Sci Med Sport* **22**, 232–238 (2019).
31. Wang, Z., Qiu, B., Gao, J. & Del Coso, J. Effects of Caffeine Intake on Endurance Running Performance and Time to Exhaustion: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients* **15**, (2022).
 32. Grgic, J. & Del Coso, J. Ergogenic Effects of Acute Caffeine Intake on Muscular Endurance and Muscular Strength in Women: A Meta-Analysis. *Int J Environ Res Public Health* **18**, (2021).
 33. Raya-González, J. *et al.* Acute Effects of Caffeine Supplementation on Movement Velocity in Resistance Exercise: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med* **50**, 717–729 (2020).
 34. Warren, G. L., Park, N. D., Maresca, R. D., McKibans, K. I. & Millard-Stafford, M. L. Effect of caffeine ingestion on muscular strength and endurance: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc* **42**, 1375–1387 (2010).
 35. Salinero, J. J. *et al.* More Research Is Necessary to Establish the Ergogenic Effect of Caffeine in Female Athletes. *Nutrients* **11**, E1600 (2019).
 36. Del Coso, J. *et al.* Effects of a caffeine-containing energy drink on simulated soccer performance. *PLoS One* **7**, (2012).
 37. Foskett, A., Ali, A. & Gant, N. Caffeine enhances cognitive function and skill performance during simulated soccer activity. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* **19**, 410–423 (2009).
 38. Lara, B. *et al.* Caffeine-containing energy drink improves physical performance in female soccer players. *Amino Acids* **46**, 1385–1392 (2014).
 39. Pérez-López, A. *et al.* Caffeinated energy drinks improve volleyball performance in elite female players. *Med Sci Sports Exerc* **47**, 850–856 (2015).
 40. Del Coso, J. *et al.* Enhancing physical performance in male volleyball players with a caffeine-containing energy drink. *Int J Sports Physiol Perform* **9**, 1013–1018 (2014).
 41. Portillo, J., Coso, J. Del & Abián-Vicén, J. Effects of Caffeine Ingestion on Skill Performance During an International Female Rugby Sevens Competition. *J Strength Cond Res* **31**, 3351–3357 (2017).
 42. Del Coso, J. *et al.* Caffeine-containing energy drink improves sprint performance during an international rugby sevens competition. *Amino Acids* **44**, 1511–1519 (2013).
 43. Muñoz, A. *et al.* Effects of Caffeine Ingestion on Physical Performance in Elite Women Handball Players: A Randomized, Controlled Study. *Int J Sports Physiol Perform* **15**, 1406–1413 (2020).
 44. Lara, B. *et al.* Acute consumption of a caffeinated energy drink enhances aspects of performance in sprint swimmers. *Br J Nutr* **114**, 908–914 (2015).
 45. Merino-Fernández, M. *et al.* Effects of 3 mg/kg Body Mass of Caffeine on the Performance of Jiu-Jitsu Elite Athletes. *Nutrients* **14**, (2022).
 46. Felipe, L. C., Lopes-Silva, J. P., Bertuzzi, R., McGinley, C. & Lima-Silva, A. E. Separate and Combined Effects of Caffeine and Sodium-Bicarbonate Intake on Judo Performance. *Int J Sports Physiol Perform* **11**, 221–226 (2016).
 47. Abian, P. *et al.* The ingestion of a caffeinated energy drink improves jump performance and activity patterns in elite badminton players. *J Sports Sci* **33**, 1042–1050 (2015).

48. Clarke, N. D. & Duncan, M. J. Effect of Carbohydrate and Caffeine Ingestion on Badminton Performance. *Int J Sports Physiol Perform* **11**, 108–115 (2016).
49. Gallo-Salazar, C. *et al.* Enhancing physical performance in elite junior tennis players with a caffeinated energy drink. *Int J Sports Physiol Perform* **10**, 305–310 (2015).
50. Costill, D. L., Dalsky, G. P. & Fink, W. J. Effects of caffeine ingestion on metabolism and exercise performance. *Med Sci Sports* **10**, 155–8 (1978).
51. Chesley, A., Howlett, R. A., Heigenhauser, G. J. F., Hultman, E. & Spriet, L. L. Regulation of muscle glycogenolytic flux during intense aerobic exercise after caffeine ingestion. *Am J Physiol* **275**, (1998).
52. Spriet, L. L. *et al.* Caffeine ingestion and muscle metabolism during prolonged exercise in humans. *Am J Physiol* **262**, (1992).
53. Graham, T. E. Caffeine and exercise: metabolism, endurance and performance. *Sports Med* **31**, 785–807 (2001).
54. Meeusen, R., Roelands, B. & Spriet, L. L. Caffeine, exercise and the brain. *Nestle Nutr Inst Workshop Ser* **76**, 1–12 (2013).
55. Fredholm, B. B., Chen, J. F., Cunha, R. A., Svenningsson, P. & Vaugeois, J. M. Adenosine and Brain Function. *Int Rev Neurobiol* **63**, 191–270 (2005).
56. Fredholm, B. B. Astra Award Lecture. Adenosine, adenosine receptors and the actions of caffeine. *Pharmacol Toxicol* **76**, 93–101 (1995).
57. Davis, J. K. & Green, J. M. Caffeine and anaerobic performance: ergogenic value and mechanisms of action. *Sports Med* **39**, 813–832 (2009).
58. Grgic, J. & Mikulic, P. Caffeine ingestion acutely enhances muscular strength and power but not muscular endurance in resistance-trained men. *Eur J Sport Sci* **17**, 1029–1036 (2017).
59. Black, C. D., Waddell, D. E. & Gonglach, A. R. Caffeine's Ergogenic Effects on Cycling: Neuromuscular and Perceptual Factors. *Med Sci Sports Exerc* **47**, 1145–1158 (2015).
60. Ruíz-Moreno, C. *et al.* Acute caffeine intake increases muscle oxygen saturation during a maximal incremental exercise test. *Br J Clin Pharmacol* **86**, 861–867 (2020).
61. Duncan, M. J., Stanley, M., Parkhouse, N., Cook, K. & Smith, M. Acute caffeine ingestion enhances strength performance and reduces perceived exertion and muscle pain perception during resistance exercise. *Eur J Sport Sci* **13**, 392–399 (2013).
62. Powers, S. K. & Dodd, S. Caffeine and endurance performance. *Sports Med* **2**, 165–174 (1985).
63. Jacobson, B. H. & Kulling, F. A. Health and ergogenic effects of caffeine. *Br J Sports Med* **23**, 34–40 (1989).
64. Neyroud, D. *et al.* Toxic doses of caffeine are needed to increase skeletal muscle contractility. *Am J Physiol Cell Physiol* **316**, C246–C251 (2019).
65. Lindinger, M. I., Graham, T. E. & Spriet, L. L. Caffeine attenuates the exercise-induced increase in plasma [K⁺] in humans. *J Appl Physiol (1985)* **74**, 1149–1155 (1993).
66. Bazzucchi, I., Felici, F., Montini, M., Figura, F. & Sacchetti, M. Caffeine improves neuromuscular function during maximal dynamic exercise. *Muscle Nerve* **43**, 839–844 (2011).

67. Graham, T. E. & Spriet, L. L. Metabolic, catecholamine, and exercise performance responses to various doses of caffeine. *J Appl Physiol* (1985) **78**, 867–874 (1995).
68. Ammon, H. P. Biochemical mechanism of caffeine tolerance. *Arch Pharm (Weinheim)* **324**, 261–267 (1991).
69. Fredholm, B. B. Adenosine actions and adenosine receptors after 1 week treatment with caffeine. *Acta Physiol Scand* **115**, 283–286 (1982).
70. Green, R. M. & Stiles, G. L. Chronic caffeine ingestion sensitizes the A1 adenosine receptor-adenylate cyclase system in rat cerebral cortex. *J Clin Invest* **77**, 222–227 (1986).
71. Ramkumar, V., Bumgarner, J. R., Jacobson, K. A. & Stiles, G. L. Multiple components of the A1 adenosine receptor-adenylate cyclase system are regulated in rat cerebral cortex by chronic caffeine ingestion. *J Clin Invest* **82**, 242–247 (1988).
72. Somani, S. M. & Gupta, P. Caffeine: a new look at an age-old drug. *Int J Clin Pharmacol* **26**, 521–533 (1988).
73. Tang Liu, D. D. S., Williams, R. L. & Riegelman, S. Disposition of caffeine and its metabolites in man. *J Pharmacol Exp Ther* **224**, 180–185 (1983).
74. Blanchard, J. & Sawers, S. J. A. The absolute bioavailability of caffeine in man. *Eur J Clin Pharmacol* **24**, 93–98 (1983).
75. Kamimori, G. H. *et al.* The rate of absorption and relative bioavailability of caffeine administered in chewing gum versus capsules to normal healthy volunteers. *Int J Pharm* **234**, 159–167 (2002).
76. Mandel, H. G. Update on caffeine consumption, disposition and action. *Food and Chemical Toxicology* **40**, 1231–1234 (2002).
77. Thorn, C. F., Aklillu, E., McDonagh, E. M., Klein, T. E. & Altman, R. B. PharmGKB summary: caffeine pathway. *Pharmacogenet Genomics* **22**, 389–395 (2012).
78. Burke, L. M. Caffeine and sports performance. *Appl Physiol Nutr Metab* **33**, 1319–1334 (2008).
79. Durrant, K. L. Known and hidden sources of caffeine in drug, food, and natural products. *J Am Pharm Assoc (Wash)* **42**, 625–637 (2002).
80. Mitchell, D. C., Knight, C. A., Hockenberry, J., Teplansky, R. & Hartman, T. J. Beverage caffeine intakes in the U.S. *Food Chem Toxicol* **63**, 136–142 (2014).
81. Campbell, B. *et al.* International Society of Sports Nutrition position stand: energy drinks. *J Int Soc Sports Nutr* **10**, (2013).
82. Hodgson, A. B., Randell, R. K. & Jeukendrup, A. E. The metabolic and performance effects of caffeine compared to coffee during endurance exercise. *PLoS One* **8**, (2013).
83. Grgic, J., Mikulic, P., Schoenfeld, B. J., Bishop, D. J. & Pedisic, Z. The Influence of Caffeine Supplementation on Resistance Exercise: A Review. *Sports Medicine* 2018 **49:1** **49**, 17–30 (2018).
84. Wickham, K. A. & Spriet, L. L. Administration of Caffeine in Alternate Forms. *Sports Med* **48**, 79–91 (2018).
85. Karayigit, R. *et al.* High Dose of Caffeine Mouth Rinse Increases Resistance Training Performance in Men. *Nutrients* **13**, (2021).
86. Wilk, M. *et al.* Acute Caffeine Intake Enhances Mean Power Output and Bar Velocity during the Bench Press Throw in Athletes Habituated to Caffeine. *Nutrients* **12**, (2020).

87. Polito, M. D., Grandolfi, K. & de Souza, D. B. Caffeine and resistance exercise: the effects of two caffeine doses and the influence of individual perception of caffeine. *Eur J Sport Sci* **19**, 1342–1348 (2019).
88. Grgic, J. *et al.* What Dose of Caffeine to Use: Acute Effects of 3 Doses of Caffeine on Muscle Endurance and Strength. *Int J Sports Physiol Perform* **15**, 470–477 (2019).
89. Filip-Stachnik, A. *et al.* The effects of different doses of caffeine on maximal strength and strength-endurance in women habituated to caffeine. *J Int Soc Sports Nutr* **18**, (2021).
90. Wilk, M., Krzysztofik, M., Filip, A., Zajac, A. & Del Coso, J. Correction: Wilk et al. “The Effects of High Doses of Caffeine on Maximal Strength and Muscular Endurance in Athletes Habituated to Caffeine” *Nutrients*, 2019, 11(8), 1912. *Nutrients* **11**, 1912 (2019).
91. Pallarés, J. G. *et al.* Neuromuscular responses to incremental caffeine doses: performance and side effects. *Med Sci Sports Exerc* **45**, 2184–2192 (2013).
92. Waller, G., Dolby, M., Steele, J. & Fisher, J. P. A low caffeine dose improves maximal strength, but not relative muscular endurance in either heavier-or lighter-loads, or perceptions of effort or discomfort at task failure in females. *PeerJ* **2020**, (2020).
93. Del Coso, J., Salinero, J. J., González-Millán, C., Abián-Vicén, J. & Pérez-González, B. Dose response effects of a caffeine-containing energy drink on muscle performance: a repeated measures design. *J Int Soc Sports Nutr* **9**, (2012).
94. Ryan, E. J. *et al.* Caffeine gum and cycling performance: a timing study. *J Strength Cond Res* **27**, 259–264 (2013).
95. De Pauw, K. *et al.* Electro-physiological changes in the brain induced by caffeine or glucose nasal spray. *Psychopharmacology (Berl)* **234**, 53–62 (2017).
96. De Pauw, K. *et al.* Do Glucose and Caffeine Nasal Sprays Influence Exercise or Cognitive Performance? *Int J Sports Physiol Perform* **12**, 1186–1191 (2017).
97. Laizure, S. C. *et al.* Comparison of caffeine disposition following administration by oral solution (energy drink) and inspired powder (AeroShot) in human subjects. *Br J Clin Pharmacol* **83**, 2687–2694 (2017).
98. Williams, J. H. Caffeine, neuromuscular function and high-intensity exercise performance. *J Sports Med Phys Fitness* **31**, 481–489 (1991).
99. Hyde, I. H., Root, C. B. & Curl, H. A Comparison of the Effects of Breakfast, of No Breakfast and of Caffeine on Work in an Athlete and a Non-Athlete. *American Journal of Physiology-Legacy Content* **43**, 371–394 (1917).
100. Thornton, G. R., Holck, H. G. O. & Smith, E. L. The effect of benzedrine and caffeine upon performance in certain psychomotor tasks. *The Journal of Abnormal and Social Psychology* **34**, 96–113 (1939).
101. Weber, A. & Herz, R. The relationship between caffeine contracture of intact muscle and the effect of caffeine on reticulum. *J Gen Physiol* **52**, 750–759 (1968).
102. Varagić, V. M. & Zugić, M. Interactions of xanthine derivatives, catecholamines and glucose-6-phosphate on the isolated phrenic nerve diaphragm preparation of the rat. *Pharmacology* **5**, 275–286 (1971).
103. Isaacson, A. & Sandow, A. Caffeine effects on radiocalcium movement in normal and denervated rat skeletal muscle. *J Pharmacol Exp Ther* **155**, 376–388 (1967).

104. Lüttgau, H. C. & Oetliker, H. The action of caffeine on the activation of the contractile mechanism in strained muscle fibres. *J Physiol* **194**, 51–74 (1968).
105. Tarnopolsky, M. A. Effect of caffeine on the neuromuscular system—potential as an ergogenic aid. *Appl Physiol Nutr Metab* **33**, 1284–1289 (2008).
106. Grgic, J. Caffeine ingestion enhances Wingate performance: a meta-analysis. *Eur J Sport Sci* **18**, 219–225 (2018).
107. Grgic, J. & Pickering, C. The effects of caffeine ingestion on isokinetic muscular strength: A meta-analysis. *J Sci Med Sport* **22**, 353–360 (2019).
108. Astorino, T. A., Rohmann, R. L. & Firth, K. Effect of caffeine ingestion on one-repetition maximum muscular strength. *Eur J Appl Physiol* **102**, 127–132 (2008).
109. Williams, A. D., Cribb, P. J., Cooke, M. B. & Hayes, A. The effect of ephedra and caffeine on maximal strength and power in resistance-trained athletes. *J Strength Cond Res* **22**, 464–470 (2008).
110. Goldstein, E., Jacobs, P. L., Whitehurst, M., Penhollow, T. & Antonio, J. Caffeine enhances upper body strength in resistance-trained women. *J Int Soc Sports Nutr* **7**, 18 (2010).
111. Wilk, M., Krzysztofik, M., Filip, A., Zajac, A. & Del Coso, J. The Effects of High Doses of Caffeine on Maximal Strength and Muscular Endurance in Athletes Habituated to Caffeine. *Nutrients* **11**, 1912 (2019).
112. Norum, M. *et al.* Caffeine increases strength and power performance in resistance-trained females during early follicular phase. *Scand J Med Sci Sports* **30**, 2116–2129 (2020).
113. Cesareo, K. R., Mason, J. R., Saracino, P. G., Morrissey, M. C. & Ormsbee, M. J. The effects of a caffeine-like supplement, TeaCrine®, on muscular strength, endurance and power performance in resistance-trained men. *J Int Soc Sports Nutr* **16**, 1–11 (2019).
114. Cronin, J., Lawton, T., Harris, N., Kilding, A. & McMaster, D. T. A brief review of handgrip strength and sport performance. *J Strength Cond Res* **31**, 3187–3217 (2017).
115. Abian, P. *et al.* The ingestion of a caffeinated energy drink improves jump performance and activity patterns in elite badminton players. *J Sports Sci* **33**, 1042–1050 (2015).
116. Andre, T., Green, M., Gann, J., O’Neal, E. & Coates, T. Effects of Caffeine on Repeated Upper/Lower Body Wingates and Handgrip Performance. *Int J Exerc Sci* **8**, (2015).
117. Da Silva Athayde, M. S., Kons, R. L. & Detanico, D. Can Caffeine Intake Improve Neuromuscular and Technical-Tactical Performance During Judo Matches? *J Strength Cond Res* **32**, 3095–3102 (2018).
118. Cornish, R. S., Bolam, K. A. & Skinner, T. L. Effect of caffeine on exercise capacity and function in prostate cancer survivors. *Med Sci Sports Exerc* **47**, 468–475 (2015).
119. Diaz-Lara, F. J. *et al.* Caffeine improves muscular performance in elite Brazilian Jiu-jitsu athletes. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1143036> **16**, 1079–1086 (2016).
120. Kammerer, M., Jaramillo, J. A., García, A., Calderin, J. C. & Valbuena, L. H. Effects of energy drink major bioactive compounds on the performance of young adults

- in fitness and cognitive tests: a randomized controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr* **11**, (2014).
121. Lara, B. *et al.* Acute consumption of a caffeinated energy drink enhances aspects of performance in sprint swimmers. *Br J Nutr* **114**, 908–914 (2015).
 122. Lopes-Silva, J. P., Rocha, A. L. S. da, Rocha, J. C. C., Silva, V. F. dos S. & Correia-Oliveira, C. R. Caffeine ingestion increases the upper-body intermittent dynamic strength endurance performance of combat sports athletes. <https://doi.org/10.1080/17461391.2021.1874058> **22**, 227–236 (2021).
 123. Muñoz, A. *et al.* Effects of CYP1A2 and ADORA2A genotypes on the ergogenic response to caffeine in professional handball players. *Genes (Basel)* **11**, 1–16 (2020).
 124. Spineli, H. *et al.* Caffeine improves various aspects of athletic performance in adolescents independent of their 163 C > A CYP1A2 genotypes. *Scand J Med Sci Sports* **30**, 1869–1877 (2020).
 125. Grgic, J. Effects of caffeine on isometric handgrip strength: A meta-analysis. *Clin Nutr ESPEN* **47**, 89–95 (2022).
 126. Gentil, P., Del Vecchio, F. B., Paoli, A., Schoenfeld, B. J. & Bottaro, M. Isokinetic Dynamometry and 1RM Tests Produce Conflicting Results for Assessing Alterations in Muscle Strength. *J Hum Kinet* **56**, 19 (2017).
 127. Bianco, A. *et al.* The sit up test to exhaustion as a test for muscular endurance evaluation. *Springerplus* **4**, (2015).
 128. Ferreira, T. T., da Silva, J. V. F. & Bueno, N. B. Effects of caffeine supplementation on muscle endurance, maximum strength, and perceived exertion in adults submitted to strength training: a systematic review and meta-analyses. *Crit Rev Food Sci Nutr* **61**, 2587–2600 (2021).
 129. Souza, D. B., Duncan, M. & Polito, M. D. Improvement of Lower-Body Resistance-Exercise Performance With Blood-Flow Restriction Following Acute Caffeine Intake. *Int J Sports Physiol Perform* **14**, 216–221 (2019).
 130. Grgic, J. *et al.* CYP1A2 genotype and acute effects of caffeine on resistance exercise, jumping, and sprinting performance. *J Int Soc Sports Nutr* **17**, (2020).
 131. Haff, G. G. & Nimphius, S. Training principles for power. *Strength Cond J* **34**, 2–12 (2012).
 132. Mora-Rodríguez, R., Pallarés, J. G., López-Samanes, Á., Ortega, J. F. & Fernández-Elías, V. E. Caffeine Ingestion Reverses the Circadian Rhythm Effects on Neuromuscular Performance in Highly Resistance-Trained Men. *PLoS One* **7**, 33807 (2012).
 133. Diaz-Lara, F. J. *et al.* Caffeine improves muscular performance in elite Brazilian Jiu-jitsu athletes. *Eur J Sport Sci* **16**, 1079–1086 (2016).
 134. Venier, S., Grgic, J. & Mikulic, P. Caffeinated Gel Ingestion Enhances Jump Performance, Muscle Strength, and Power in Trained Men. *Nutrients* **11**, E937 (2019).
 135. Venier, S., Grgic, J. & Mikulic, P. Acute Enhancement of Jump Performance, Muscle Strength, and Power in Resistance-Trained Men After Consumption of Caffeinated Chewing Gum. *Int J Sports Physiol Perform* **14**, 1415–1421 (2019).
 136. Degrange, T. *et al.* Acute Caffeine Ingestion Increases Velocity and Power in Upper and Lower Body Free-Weight Resistance Exercises. *Int J Exerc Sci* (2019).

137. Raya-González, J. *et al.* Acute Effects of Caffeine Supplementation on Movement Velocity in Resistance Exercise: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med* **50**, 717–729 (2020).
138. Beaumont, R. *et al.* Chronic ingestion of a low dose of caffeine induces tolerance to the performance benefits of caffeine. *J Sports Sci* **35**, 1920–1927 (2017).
139. Lara, B., Ruiz-Moreno, C., Salinero, J. J. & Del Coso, J. Time course of tolerance to the performance benefits of caffeine. *PLoS One* **14**, e0210275 (2019).
140. Salinero, J. J. *et al.* The use of energy drinks in sport: perceived ergogenicity and side effects in male and female athletes. *Br J Nutr* **112**, 1494–1502 (2014).
141. Grosso, G., Godos, J., Galvano, F. & Giovannucci, E. L. Coffee, Caffeine, and Health Outcomes: An Umbrella Review. *Annual Review of Nutrition* Preprint at <https://doi.org/10.1146/annurev-nutr-071816-064941> (2017).
142. Clauson, K. A., Shields, K. M., McQueen, C. E. & Persad, N. Safety issues associated with commercially available energy drinks. *Journal of the American Pharmacists Association* **48**, (2008).
143. Wikoff, D. *et al.* Systematic review of the potential adverse effects of caffeine consumption in healthy adults, pregnant women, adolescents, and children. *Food Chem Toxicol* **109**, 585–648 (2017).
144. Ruiz-Moreno, C. *et al.* Time course of tolerance to adverse effects associated with the ingestion of a moderate dose of caffeine. *Eur J Nutr* **59**, 3293–3302 (2020).
145. Bell, D. G. & McLellan, T. M. Exercise endurance 1, 3, and 6 h after caffeine ingestion in caffeine users and nonusers. *J Appl Physiol* (2002) doi:10.1152/jappphysiol.00187.2002.
146. Corti, R. *et al.* Coffee acutely increases sympathetic nerve activity and blood pressure independently of caffeine content role of habitual versus nonhabitual drinking. *Circulation* (2002) doi:10.1161/01.CIR.0000046228.97025.3A.
147. Vera, J., Redondo, B., Molina, R., Bermúdez, J. & Jiménez, R. Effects of caffeine on intraocular pressure are subject to tolerance: a comparative study between low and high caffeine consumers. *Psychopharmacology (Berl)* (2019) doi:10.1007/s00213-018-5114-2.
148. Domaszewski, P. Gender Differences in the Frequency of Positive and Negative Effects after Acute Caffeine Consumption. *Nutrients* **15**, 1318 (2023).
149. Temple, J. L., Bulkley, A. M., Briatico, L. & Dewey, A. M. Sex differences in reinforcing value of caffeinated beverages in adolescents. *Behavioural pharmacology* **20**, 731–741 (2009).
150. Jenkins, N. T., Trilk, J. L., Singhal, A., O'Connor, P. J. & Cureton, K. J. Ergogenic effects of low doses of caffeine on cycling performance. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* **18**, 328–342 (2008).
151. Puente, C., Abián-Vicén, J., Coso, J. Del, Lara, B. & Salinero, J. J. The CYP1A2 -163C>A polymorphism does not alter the effects of caffeine on basketball performance. *PLoS One* **13**, (2018).
152. Salinero, J. J. *et al.* CYP1A2 genotype variations do not modify the benefits and drawbacks of caffeine during exercise: A pilot study. *Nutrients* (2017) doi:10.3390/nu9030269.
153. Del Coso, J., Lara, B., Ruiz-Moreno, C. & Salinero, J. J. Challenging the Myth of Non-Response to the Ergogenic Effects of Caffeine Ingestion on Exercise Performance. *Nutrients* **11**, (2019).

154. Pickering, C. Caffeine, CYP1A2 genotype, and sports performance: is timing important? *Ir J Med Sci* **188**, 349–350 (2019).
155. Pickering, C. & Kiely, J. Are the Current Guidelines on Caffeine Use in Sport Optimal for Everyone? Inter-individual Variation in Caffeine Ergogenicity, and a Move Towards Personalised Sports Nutrition. *Sports Med* **48**, 7–16 (2018).
156. Yang, A., Palmer, A. A. & de Wit, H. Genetics of caffeine consumption and responses to caffeine. *Psychopharmacology (Berl)* **211**, 245–257 (2010).
157. Nehlig, A. Interindividual Differences in Caffeine Metabolism and Factors Driving Caffeine Consumption. *Pharmacol Rev* **70**, 384–411 (2018).
158. Sachse, C., Brockmöller, J., Bauer, S. & Roots, I. Functional significance of a C→A polymorphism in intron 1 of the cytochrome P450 CYP1A2 gene tested with caffeine. *Br J Clin Pharmacol* **47**, 445–449 (1999).
159. Guest, N., Corey, P., Vescovi, J. & El-Sohemy, A. Caffeine, CYP1A2 genotype, and endurance performance in athletes. *Med Sci Sports Exerc* **50**, 1570–1578 (2018).
160. Salinero, J. J. *et al.* CYP1A2 Genotype Variations Do Not Modify the Benefits and Drawbacks of Caffeine during Exercise: A Pilot Study. *Nutrients* **9**, (2017).
161. Klein, C. S. *et al.* The Effect of Caffeine on Performance in Collegiate Tennis Players. *J Caffeine Res* **2**, 111–116 (2012).
162. Cornelis, M. C., El-Sohemy, A. & Campos, H. Genetic polymorphism of the adenosine A2A receptor is associated with habitual caffeine consumption. *Am J Clin Nutr* **86**, 240–244 (2007).
163. Byrne, E. M. *et al.* A Genome-Wide Association Study of Caffeine-Related Sleep Disturbance: Confirmation of a Role for a Common Variant in the Adenosine Receptor. *Sleep* **35**, 967 (2012).
164. Rétey, J. V. *et al.* A genetic variation in the adenosine A2A receptor gene (ADORA2A) contributes to individual sensitivity to caffeine effects on sleep. *Clin Pharmacol Ther* **81**, 692–698 (2007).
165. Loy, B. D., O'Connor, P. J., Lindheimer, J. B. & Covert, S. F. Caffeine Is Ergogenic for Adenosine A2A Receptor Gene (ADORA2A) T Allele Homozygotes: A Pilot Study. <https://home.liebertpub.com/caff> **5**, 73–81 (2015).
166. Carswell, A. T., Howland, K., Martinez-Gonzalez, B., Baron, P. & Davison, G. The effect of caffeine on cognitive performance is influenced by CYP1A2 but not ADORA2A genotype, yet neither genotype affects exercise performance in healthy adults. *Eur J Appl Physiol* **120**, 1495 (2020).
167. DTravis, T., Kelly Anne, E. & Louise M, B. American College of Sports Medicine Joint Position Statement. Nutrition and Athletic Performance. *Med Sci Sports Exerc* **48**, 543–568 (2016).
168. Skinner, T. L. *et al.* Women Experience the Same Ergogenic Response to Caffeine as Men. *Med Sci Sports Exerc* **51**, 1195–1202 (2019).
169. Clarke, N. D., Kirwan, N. A. & Richardson, D. L. Coffee Ingestion Improves 5 km Cycling Performance in Men and Women by a Similar Magnitude. *Nutrients* **2019**, Vol. 11, Page 2575 **11**, 2575 (2019).
170. Lara, B., Salinero, J. J., Giráldez-Costas, V. & Del Coso, J. Similar ergogenic effect of caffeine on anaerobic performance in men and women athletes. *Eur J Nutr* **60**, 4107–4114 (2021).

171. Sabblah, S., Dixon, D. & Bottoms, L. Sex differences on the acute effects of caffeine on maximal strength and muscular endurance. <https://doi.org/10.3920/CEP150010> **11**, 89–94 (2015).
172. Bambaiechi, E., Reilly, T., Cable, N. T. & Giacomoni, M. The isolated and combined effects of menstrual cycle phase and time-of-day on muscle strength of eumenorrheic females. *Chronobiol Int* **21**, 645–660 (2004).
173. Temple, J. L. & Ziegler, A. M. Gender Differences in Subjective and Physiological Responses to Caffeine and the Role of Steroid Hormones. *J Caffeine Res* **1**, 41–48 (2011).
174. Temple, J. L., Ziegler, A. M., Martin, C. & de Wit, H. Subjective Responses to Caffeine Are Influenced by Caffeine Dose, Sex, and Pubertal Stage. *J Caffeine Res* **5**, 167–175 (2015).
175. Kamimori, G. H., Joubert, A., Otterstetter, R., Santaromana, M. & Eddington, N. D. The effect of the menstrual cycle on the pharmacokinetics of caffeine in normal, healthy eumenorrheic females. *Eur J Clin Pharmacol* **55**, 445–449 (1999).
176. McLean, C. & Graham, T. E. Effects of exercise and thermal stress on caffeine pharmacokinetics in men and eumenorrheic women. *J Appl Physiol (1985)* **93**, 1471–1478 (2002).
177. Granfors, M. T., Backman, J. T., Laitila, J. & Neuvonen, P. J. Oral contraceptives containing ethinyl estradiol and gestodene markedly increase plasma concentrations and effects of tizanidine by inhibiting cytochrome P450 1A2. *Clin Pharmacol Ther* **78**, 400–411 (2005).
178. Abernethy, D. R. & Todd, E. L. Impairment of caffeine clearance by chronic use of low-dose oestrogen-containing oral contraceptives. *Eur J Clin Pharmacol* **28**, 425–428 (1985).
179. Lara, B. *et al.* Ergogenic effects of caffeine on peak aerobic cycling power during the menstrual cycle. *Eur J Nutr* **59**, 2525–2534 (2020).
180. Lara, B., Gutiérrez Hellín, J., Ruíz-Moreno, C., Romero-Moraleda, B. & Del Coso, J. Acute caffeine intake increases performance in the 15-s Wingate test during the menstrual cycle. *Br J Clin Pharmacol* **86**, 745–752 (2020).
181. Romero-Moraleda, B., Coso, J. Del, Gutiérrez-Hellín, J. & Lara, B. The Effect of Caffeine on the Velocity of Half-Squat Exercise during the Menstrual Cycle: A Randomized Controlled Trial. *Nutrients* **11**, (2019).
182. The jamovi project. Preprint at (2022).
183. Kedia, A. W. *et al.* Effects of a pre-workout supplement on lean mass, muscular performance, subjective workout experience and biomarkers of safety. *Int J Med Sci* **11**, 116–126 (2014).
184. Lopes, J. M., Aubier, M., Jardim, J., Aranda, J. V & Macklem, P. T. Effect of caffeine on skeletal muscle function before and after fatigue. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* **54**, 1303–1305 (1983).
185. Lopes-Silva, J. P., Rocha, A. L. S. da, Rocha, J. C. C., Silva, V. F. D. S. & Correia-Oliveira, C. R. Caffeine ingestion increases the upper-body intermittent dynamic strength endurance performance of combat sports athletes. *Eur J Sport Sci* **22**, 227–236 (2022).
186. Spineli, H. *et al.* Caffeine improves various aspects of athletic performance in adolescents independent of their 163 C A CYP1A2 genotypes. *Scand J Med Sci Sports* **30**, 1869–1877 (2020).

187. Suksuwan, C., Phoemsapthawee, J. & Tumnark, P. Effects of a Low-Dose of Caffeine Co-Ingestion with Carbohydrate on Muscular Strength, Power, and Anaerobic Performance in Combat Sports Athletes. *J Exerc Physiol Online* **25**, 26–38 (2022).
188. Turley, K., Eusse, P. A., Thomas, M. M., Townsend, J. R. & Morton, A. B. Effects of different doses of caffeine on anaerobic exercise in boys. *Pediatr Exerc Sci* **27**, 50–56 (2015).
189. Arazi, H., Hoseinihaji, M. & Eghbali, E. The effects of different doses of caffeine on performance, rating of perceived exertion and pain perception in teenagers female karate athletes. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* **52**, 685–692 (2016).
190. Arazi, H., Rakhshanfar, S., Eghbali, E. & Suzuki, K. Acute influence of caffeinated commercially available energy drinks on performance, perceived exertion and blood lactate in youth female water polo players. *Progress in Nutrition* **23**, e2021220–e2021220 (2021).
191. Arazi, H., Najafdari, A. & Eghbali, E. Effect of Big Bear energy drink on performance indicators, blood lactate levels and rating of perceived exertion in elite adolescent female swimmers. *Progress in Nutrition* **18**, 403–410 (2016).
192. Waer, F. Ben *et al.* Functional and cognitive responses to caffeine intake in middle-aged women are dose depending. *Behavioural Brain Research* **397**, 112956 (2021).
193. Tallis, J. *et al.* Assessment of the ergogenic effect of caffeine supplementation on mood, anticipation timing, and muscular strength in older adults. *Physiol Rep* **1**, e00072 (2013).
194. Norager, C. B., Jensen, M. B., Madsen, M. R. & Laurberg, S. Caffeine improves endurance in 75-yr-old citizens: a randomized, double-blind, placebo-controlled, crossover study. *J Appl Physiol (1985)* **99**, 2302–2306 (2005).
195. H Brooks, J. & Wyld, K. Acute Effects of Caffeine on Strength Performance in Trained and Untrained Individuals. *J Athl Enhanc* **04**, (2015).
196. Berjisian, E. *et al.* Are Caffeine’s Effects on Resistance Exercise and Jumping Performance Moderated by Training Status? *Nutrients* **14**, 4840 (2022).
197. Martinez, N., Campbell, B., Franek, M., Buchanan, L. & Colquhoun, R. The effect of acute pre-workout supplementation on power and strength performance. *J Int Soc Sports Nutr* **13**, 29 (2016).
198. Ormsbee, M. J. *et al.* The effects of six weeks of supplementation with multi-ingredient performance supplements and resistance training on anabolic hormones, body composition, strength, and power in resistance-trained men. *J Int Soc Sports Nutr* **9**, 49 (2012).
199. Tinsley, G. M. *et al.* Influence of A Thermogenic Dietary Supplement on Safety Markers, Body Composition, Energy Expenditure, Muscular Performance and Hormone Concentrations: A Randomized, Placebo-Controlled, Double-Blind Trial. *J Sports Sci Med* **16**, 459 (2017).
200. Dittrich, N., Serpa, M. C., Lemos, E. C., De Lucas, R. D. & Guglielmo, L. G. A. Effects of Caffeine Chewing Gum on Exercise Tolerance and Neuromuscular Responses in Well-Trained Runners. *J Strength Cond Res* **35**, 1671–1676 (2021).

201. Ratamess, N. A. *et al.* The effects of supplementation with P-Syneprine alone and in combination with caffeine on resistance exercise performance. *J Int Soc Sports Nutr* **12**, 35 (2015).
202. Pereira, P. E. A., Azevedo, P., Azevedo, K., Azevedo, W. & Machado, M. Caffeine Supplementation or Carbohydrate Mouth Rinse Improves Performance. *Int J Sports Med* **42**, 147–152 (2021).
203. Karuk, H. N., Rudarli Nalcakan, G. & Pekünlü, E. Effects of carbohydrate and caffeine combination mouth rinse on anaerobic performance of highly trained male athletes. *Eur J Sport Sci* **22**, 589–599 (2022).
204. Clarke, N. D., Kornilios, E. & Richardson, D. L. Carbohydrate and caffeine mouth rinses do not affect maximum strength and muscular endurance performance. *J Strength Cond Res* **29**, 2926–2931 (2015).
205. Karayigit, R. *et al.* Effects of carbohydrate and caffeine mouth rinsing on strength, muscular endurance and cognitive performance. *J Int Soc Sports Nutr* **18**, (2021).
206. Wilk, M. *et al.* The Effects of the Movement Tempo on the One-Repetition Maximum Bench Press Results. *J Hum Kinet* **72**, 151 (2020).
207. Filip, A., Wilk, M., Krzysztofik, M. & Del Coso, J. Inconsistency in the Ergogenic Effect of Caffeine in Athletes Who Regularly Consume Caffeine: Is It Due to the Disparity in the Criteria That Defines Habitual Caffeine Intake? *Nutrients* **12**, (2020).
208. Burke, L. M., Hawley, J. A., S Wong, S. H. & Jeukendrup, A. E. Carbohydrates for training and competition. *J Sports Sci* **29**, 17–27 (2011).
209. Jäger, R. *et al.* International Society of Sports Nutrition Position Stand: protein and exercise. *Journal of the International Society of Sports Nutrition* **2017 14:1** **14**, 1–25 (2017).
210. McDermott, B. P. *et al.* National Athletic Trainers' Association Position Statement: Fluid Replacement for the Physically Active. *J Athl Train* **52**, 877 (2017).
211. Romero-Moraleda, B. *et al.* The Influence of the Menstrual Cycle on Muscle Strength and Power Performance. *J Hum Kinet* **68**, 123–133 (2019).
212. Weakley, J. *et al.* Show Me, Tell Me, Encourage Me: The Effect of Different Forms of Feedback on Resistance Training Performance. *J Strength Cond Res* **34**, 3157–3163 (2020).
213. Giráldez-Costas, V. *et al.* Caffeine Increases Muscle Performance During a Bench Press Training Session. *J Hum Kinet* **74**, 185 (2020).
214. Bellar, D. M. *et al.* Effects of low-dose caffeine supplementation on early morning performance in the standing shot put throw. *Eur J Sport Sci* **12**, 57–61 (2012).
215. Maughan, R. J. *et al.* IOC consensus statement: dietary supplements and the high-performance athlete. *Br J Sports Med* **52**, 439–455 (2018).
216. Bühler, E., Lachenmeier, D. W., Schlegel, K. & Winkler, G. Development of a tool to assess the caffeine intake among teenagers and young adults. **17**, (2013).
217. Kyriazis, T. A., Terzis, G., Boudolos, K. & Georgiadis, G. Muscular power, neuromuscular activation, and performance in shot put athletes at preseason and at competition period. *J Strength Cond Res* **23**, 1773–1779 (2009).
218. Hopkins, W. G. A Scale of Magnitudes for Effect Statistics: A New View of Statistics. <http://www.sportsci.org/resource/stats/effectmag.html>. (2002).
219. Bang, H., Ni, L. & Davis, C. E. Assessment of blinding in clinical trials. *Control Clin Trials* **25**, 143–156 (2004).

220. Varillas-Delgado, D. *et al.* Effect of 3 and 6 mg/kg of caffeine on fat oxidation during exercise in healthy active women. *Biol Sport* **40**, 827–834 (2022).
221. Costello, J. T., Bieuzen, F. & Bleakley, C. M. Where are all the female participants in Sports and Exercise Medicine research? *Eur J Sport Sci* **14**, 847–851 (2014).
222. Bugyi, G. J. The effects of moderate doses of caffeine on fatigue parameters of the forearm flexor muscles. *Am Correct Ther J* **34**, 49–53 (1980).
223. Del Coso, J., Salinero, J. J., González-Millán, C., Abián-Vicén, J. & Pérez-González, B. Dose response effects of a caffeine-containing energy drink on muscle performance: a repeated measures design. *J Int Soc Sports Nutr* **9**, (2012).
224. Raya-González, J. *et al.* Acute Effects of Caffeine Supplementation on Movement Velocity in Resistance Exercise: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med* **50**, 717–729 (2020).
225. de Souza, J. G. *et al.* Risk or benefit? Side effects of caffeine supplementation in sport: a systematic review. *Eur J Nutr* **61**, 3823–3834 (2022).
226. Jacobs, I., Pasternak, H. & Bell, D. G. Effects of ephedrine, caffeine, and their combination on muscular endurance. *Med Sci Sports Exerc* **35**, 987–994 (2003).
227. Beck, T. W. *et al.* The acute effects of a caffeine-containing supplement on strength, muscular endurance, and anaerobic capabilities. *J Strength Cond Res* **20**, 506–510 (2006).
228. Astorino, T. A., Rohmann, R. L. & Firth, K. Effect of caffeine ingestion on one-repetition maximum muscular strength. *Eur J Appl Physiol* **102**, 127–132 (2008).
229. Filip-Stachnik, A., Krzysztofik, M., Del Coso, J. & Wilk, M. Acute Effects of High Doses of Caffeine on Bar Velocity during the Bench Press Throw in Athletes Habituated to Caffeine: A Randomized, Double-Blind and Crossover Study. *J Clin Med* **10**, (2021).
230. Filip-Stachnik, A., Krzysztofik, M., Del Coso, J. & Wilk, M. Acute effects of two caffeine doses on bar velocity during the bench press exercise among women habituated to caffeine: a randomized, crossover, double-blind study involving control and placebo conditions. *Eur J Nutr* **61**, 947–955 (2022).
231. Hopkins, W. G. Competitive performance of elite track-and-field athletes: variability and smallest worthwhile enhancements / by Will G Hopkins. *Sportscience*, 7 Dec 2005; v.9:p.17-20; issn: (2005).
232. Giráldez-Costas, V. *et al.* Pre-exercise Caffeine Intake Enhances Bench Press Strength Training Adaptations. *Front Nutr* **8**, 622564 (2021).
233. Power, S. & *et al.* Caffeine Supplementation for Powerlifting Competitions: an Evidence-Based Approach. *J Hum Kinet* **68**, 37–48 (2019).
234. Green, R. M. & Stiles, G. L. Chronic caffeine ingestion sensitizes the A1 adenosine receptor-adenylate cyclase system in rat cerebral cortex. *Journal of Clinical Investigation* **77**, 222–227 (1986).
235. Gonçalves, L. de S. *et al.* Dispelling the myth that habitual caffeine consumption influences the performance response to acute caffeine supplementation. *J Appl Physiol (1985)* **123**, 213–220 (2017).
236. de Salles Painelli, V. *et al.* Habitual Caffeine Consumption Does Not Interfere With the Acute Caffeine Supplementation Effects on Strength Endurance and Jumping Performance in Trained Individuals. *Int J Sport Nutr Exerc Metab* **31**, 321–328 (2021).

237. Ruiz-moreno, C., Lara, B., Gutiérrez-hellín, J., González-garcía, J. & Del Coso, J. Time Course and Magnitude of Tolerance to the Ergogenic Effect of Caffeine on the Second Ventilatory Threshold. *Life (Basel)* **10**, 1–12 (2020).
238. Del Coso, J. *et al.* Caffeine-containing energy drink improves physical performance of elite rugby players during a simulated match. *Applied Physiology, Nutrition and Metabolism* **38**, 368–374 (2013).
239. Pickering, C. & Kiely, J. Are the Current Guidelines on Caffeine Use in Sport Optimal for Everyone? Inter-individual Variation in Caffeine Ergogenicity, and a Move Towards Personalised Sports Nutrition. *Sports Med* **48**, 7–16 (2018).
240. Seifert, S. M., Schaechter, J. L., Hershorin, E. R. & Lipshultz, S. E. Health Effects of Energy Drinks on Children, Adolescents, and Young Adults. *Pediatrics* **127**, 511 (2011).
241. Miyai, N. *et al.* Blood pressure response to heart rate during exercise test and risk of future hypertension. *Hypertension* **39**, 761–766 (2002).
242. Peters, M. D. J. *et al.* Guidance for conducting systematic scoping reviews. *Int J Evid Based Healthc* **13**, 141–146 (2015).

13

ANEXOS



13.1

Anexo 1: Excel estudio 1

Título	Autor	Año	Grupo	N	N grupo	Hombres	Mujeres	Madres	Edad (media)	Edad (rango)	Dosis de cafeína	Dosis (media)	Dosis ajustada (mg/kg)	Estudios de dosis única	Estudios de dosis múltiple	Min dosis ajustada (mg/kg)	Max dosis ajustada (mg/kg)	Min dosis (mg)	Max dosis (mg)	Forma de la cafeína	Mezcla con otras sustancias	Relación con otras sustancias co-reportadas	Flexión controlada	Hábitos de consumo de cafeína	Efectos secundarios reportados	Condición física	Fecha de estudio
The action of 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1997	1997	1	15	7	15	0	0	N/A	200 mg	200 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
A comparison of 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1997	1997	2	15	7	15	0	0	27.5-115	27.5	142 gram	27.5	0	0	0	0	0	0	0	N/A	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
The effects of 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1998	1998	3	15	7	15	0	0	N/A	200 mg	200 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	N/A	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
The effects of 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1998	1998	23	21-25	25	21-25	0	0	Edad subadultos	N/A	107 mg, 424 mg and 500 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Caffeine against 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1998	1998	12	11-15	12	11-15	0	0	20-28	20.0	5 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Pharmacokinetics of 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1998	1998	6	6-10	6	6-10	0	0	23-25	23.0	5 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Influence of 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1991	1998	36	10	20	10-20	0	0	20-25	20.5	600 mg and 300 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Effect of 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1992	1998	20	10-20	20	10-20	0	0	21-11.2	21.0	7 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Caffeine against 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1994	1998	9	6-10	9	6-10	0	0	20-22	N/A	5 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Metabolic effects of 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	1998	1998	15	11-15	15	11-15	0	0	22-23.2	22.8	5 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Caffeine against 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	2000	2000-2009	12	11-15	12	11-15	0	0	Continuados	29.5	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Caffeine against 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	2001	2000-2009	15	11-15	15	11-15	0	0	21-21.6	21.6	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Effects of alpha-linolenic acid...	2001	2000-2009	13	11-15	13	11-15	0	0	18-24	20.0	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Caffeine against 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	2005	2000-2009	10	6-10	10	6-10	0	0	23-11.7	23.1	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
The effects of alpha-linolenic acid...	2005	2000-2009	23	21-25	23	21-25	0	0	11-15	12	7 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Caffeine against 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	2006	2000-2009	30	26-30	15	11-15	15	0	11-15	15	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Increased urine volume...	2006	2000-2009	10	6-10	10	6-10	0	0	21-6.21	21.6	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Effects of alpha-linolenic acid...	2007	2000-2009	8	6-10	8	6-10	0	0	20-11.6	20.5	110 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Effects of caffeine...	2007	2000-2009	17	16-20	13	11-15	4	1.5	Hombres: 21.0-11.5, 21.2	21.2	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
Effects of alpha-linolenic acid...	2007	2000-2009	15	11-15	11	11-15	4	1.5	21.5	21.0	7 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Caffeine doses...	2008	2000-2009	15	11-15	15	11-15	0	0	18-6.0-8	18.4	4.5 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
Effects of alpha-linolenic acid...	2008	2000-2009	8	6-10	8	6-10	0	0	22-20.2	20.3	110 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
Effects of caffeine...	2008	2000-2009	15	11-15	15	11-15	0	0	22-11.3	22.0	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
The acute effect of caffeine...	2008	2000-2009	21	20	21	19-20	0	0	22-12.6	23.0	200 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Effect of caffeine...	2008	2000-2009	22	21-25	22	21-25	0	0	23-4.1-6	23.4	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
The effect of caffeine...	2008	2000-2009	18	16-20	18	16-20	0	0	24-11.3	24.1	5 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
The effect of caffeine...	2008	2000-2009	9	6-10	9	6-10	0	0	24-2.1-3	24.2	300 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
Caffeine against 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	2009	2000-2009	15	11-15	15	11-15	0	0	24-2.1-3	24.2	300 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
No effect of caffeine...	2010	2010-2014	13	11-15	13	11-15	0	0	24-2.1-3	24.0	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
The influence of caffeine...	2010	2010-2014	15	11-15	15	11-15	0	0	21-2.1	21.0	3 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten inferior
Acute effects of caffeine...	2010	2010-2014	21	21-25	21	21-25	0	0	23-2.8	23.0	600 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
Low-dose caffeine...	2010	2010-2014	27	20	27	19-20	0	0	24-11.0	24.0	200 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
Caffeine against 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	2010	2010-2014	15	11-15	15	11-15	0	0	24-6.1-9	24.6	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Acquisition of caffeine...	2010	2010-2014	10	6-10	10	6-10	0	0	24-2.1-3	24.2	300 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Effect of caffeine...	2011	2010-2014	8	6-10	8	6-10	0	0	20-6.0-7	20.6	300 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
Effect of caffeine...	2011	2010-2014	13	11-15	13	11-15	0	0	22-7.0	22.7	3 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Minimal caffeine...	2011	2010-2014	14	11-15	14	11-15	0	0	23-11.1	23.1	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
Caffeine against 1,3-bis(4-hydroxyphenyl)isobutylamine...	2012	2010-2014	12	11-15	12	11-15	0	0	24-7.0-2	24.7	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
Acute caffeine...	2012	2010-2014	18	16-20	18	16-20	0	0	20-6.0-3	20.6	5 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Acute caffeine...	2012	2010-2014	16	16-20	16	16-20	0	0	20-6.0-3	20.6	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Acute caffeine...	2012	2010-2014	17	16-20	17	16-20	0	0	21.1	21.0	100 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ten superior
Effects of caffeine...	2012	2010-2014	10	6-10	10	6-10	0	0	21-3.1-4	21.9	6 mg/kg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
The acute effect of caffeine...	2012	2010-2014	13	11-15	13	11-15	0	0	22-7.0-2	22.7	179 mg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs
The effects of caffeine...	2012	2010-2014	24	21-25	24	21-25	0	0	24-0.0-9	24.0	N/A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No	No	No	No	No	N/A	Ambs



Código QR

Anexo 2: Informes favorables del comité de ética para los estudios experimentales



Dr. Francisco López Muñoz, Presidente del Comité de Ética de la Investigación de la Universidad Camilo José Cela (CEI-UCJC)

HACE CONSTAR

Que en la reunión del CEI-UCJC celebrada el día 25 de junio de 2019, se analizó la documentación de subsanación solicitada al investigador principal (Dr. Juan José Salinero Martín), del proyecto de investigación *Effects of caffeine on strength training improvements*, en el informe de fecha 22 de mayo de 2019.

Que los responsables del proyecto han realizado y subsanado todos los puntos indicados por el CEI-UCJC.

Que, se acordó por unanimidad, al considerar correctos y adecuados los aspectos éticos, metodológicos y legales del estudio, la APROBACIÓN del mismo por el CEI-UCJC.

Y para que conste, se expide el presente certificado en Madrid, a 26 de junio de 2019.

A handwritten signature in blue ink, appearing to be "F. López Muñoz", written over a horizontal line.

Fdo. Dr. Francisco López Muñoz
Presidente del CEI-UCJC



Dr. Francisco López Muñoz, Presidente del Comité de Ética de la Investigación de la Universidad Camilo José Cela (CEI-UCJC)

HACE CONSTAR

Que tras la subsanación solicitada al investigador principal (Dr. Juan José Salinero Martín), del proyecto de investigación "El efecto placebo y la ingesta de cafeína en el rendimiento deportivo en Atletismo, PLACEBO", en el informe de fecha 28 de enero de 2021,

Se acordó por unanimidad, al considerar correctos y adecuados los aspectos éticos, metodológicos y legales del estudio, la APROBACIÓN del mismo por el CEI-UCJC.

Y para que conste, se expide el presente certificado en Madrid, a 2 de febrero de 2021.

Francisco
López Muñoz

Firmado digitalmente por
Francisco López Muñoz
Fecha: 2021.02.10
13:49:29 +01'00'

Fdo. Dr. Francisco López Muñoz
Presidente del CEI-UCJC

Anexo 3: Congresos

ECSS-Congress Tools

10/11/20 21:53

**25TH ANNIVERSARY CONGRESS**

OCTOBER 28-30, 2020

EUROPEAN COLLEGE OF SPORT SCIENCE

Aachener Str. 1053 -1055
50858 Cologne

GERMANY

VAT-ID: DE251715668 - St.Nr.: 223/5905/0216

register of associations: VR12508

Cologne, 10.11.2020 - 21:52:14

Confirmation of Presentation

This is to certify that the following title has been presented at the 25th Annual Congress of the European College of Sport Science between 28 - 30 October 2020.

Verónica Giráldez Costas

University Camilo Jose Cela
Calle Castillo de Alarcón, 49.
28692 Villanueva de la Cañada, Madrid, Spain

Abstr.-ID: 1801, Presentation format: E-poster

Title: Boost your strength training with caffeine.

Authors: Giráldez-Costas, V., González-García, J., Del Coso, J., Lara, B., Salinero, J.J.

Institution: University Camilo Jose Cela

European College of Sport Science

This document has been created digitally and is valid without a signature



EUROPEAN COLLEGE OF SPORT SCIENCE

EUROPEAN COLLEGE OF SPORT SCIENCE

Aachener Str. 1053 -1055
50858 Cologne

GERMANY

VAT-ID: DE251715668 - St.Nr.: 223/5905/0216

register of associations: VR12508

Cologne, 27.09.2022 - 16:50:35

Confirmation of Presentation

This is to certify that the following title has been presented at the 27th Annual Congress of the European College of Sport Science between 30 August - 2 September 2022 in Sevilla - Spain.

Verónica Giráldez Costas

University Camilo Jose Cela
Calle Castillo de Alarcón, 49.
28692 Villanueva de la Cañada, Madrid, Spain

Abstr.-ID: 2552, Presentation format: Poster , Session name: CP-PN10 - Supplementation and metabolism

Title: Time course of tolerance to the ergogenic effects of a moderate dose of caffeine on bench press exercise.

Authors: Giráldez Costas, V., Menchén-Rubio, M., Moreno-Ruiz, C., Jiménez-Ormeño, E., Del Coso, J., Salinero, J.J., Lara, B.

Institution: University Camilo Jose Cela

Presentation date: 31.08.2022, 18:15, Lecture room: BARCELONA, No: 8

European College of Sport Science

This document has been created digitally and is valid without a signature

Anexo 4: Artículos publicados de la tesis



Review

The Long Way to Establish the Ergogenic Effect of Caffeine on Strength Performance: An Overview Review

Verónica Giráldez-Costas ^{1,2,*}, Juan Del Coso ³, Asier Mañas ^{4,5,6,7} and Juan José Salinero ⁸

- ¹ Exercise Physiology Laboratory, Camilo José Cela University, 28692 Madrid, Spain
² Strength Training & Neuromuscular Performance (STreNghtP) Research Group, Camilo José Cela University, 28692 Madrid, Spain
³ Centre for Sport Studies, Rey Juan Carlos University, 28942 Fuenlabrada, Spain
⁴ GENUD Toledo Research Group, University of Castilla-La Mancha, 45071 Toledo, Spain
⁵ CIBER of Frailty and Healthy Aging (CIBERFES), Instituto de Salud Carlos III, 28029 Madrid, Spain
⁶ Center UCM-ISCIll for Human Evolution and Behavior, 28029 Madrid, Spain
⁷ Faculty of Education, Complutense University of Madrid, 28040 Madrid, Spain
⁸ Sport Training Laboratory, Faculty of Sport Sciences, Castilla-La Mancha University, 45071 Toledo, Spain
* Correspondence: vgiraldez@ucjc.edu

Abstract: This overview review aimed to describe the evolution of the characteristics of the research on caffeine effects on strength. A total of 189 experimental studies with 3459 participants were included. The median sample size was 15 participants, with an over-representation of men vs. women (79.4 vs. 20.6%). Studies on young participants and elders were scarce (4.2%). Most studies tested a single dose of caffeine (87.3%), while 72.0% used doses adjusted to body mass. Single-dose studies ranged from 1.7 to 7 mg/kg (4.8 ± 1.4 mg/kg), while dose–response studies ranged from 1 to 12 mg/kg. Caffeine was mixed with other substances in 27.0% of studies, although only 10.1% of studies analyzed the caffeine interaction with these substances. Capsules (51.9%) and beverages (41.3%) were the most common forms of caffeine administration. Similar proportions of studies focused on upper (24.9%) or lower body strength 37.6% (37.6% both). Participants' daily intake of caffeine was reported in 68.3% of studies. Overall, the pattern in the study of caffeine's effects on strength performance has been carried out with experiments including 11–15 adults, using a single and moderate dose of caffeine adjusted to participants' body mass in the form of a capsule.

Keywords: coffee; ergogenic aid; muscle force; muscle power; stimulant; exercise performance



Citation: Giráldez-Costas, V.; Del Coso, J.; Mañas, A.; Salinero, J.J. The Long Way to Establish the Ergogenic Effect of Caffeine on Strength Performance: An Overview Review. *Nutrients* **2023**, *15*, 1178. <https://doi.org/10.3390/nu15051178>

Academic Editor: Ajmol Ali

Received: 14 February 2023
 Accepted: 22 February 2023
 Published: 27 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

While the first reviews that summarized findings of studies on caffeine and sports performance confirmed the ergogenic effect of caffeine on aerobic performance already in the 1980s [1,2], the potential benefit of caffeine supplementation on muscle strength was rejected for several years [1–3]. In the 1980s, the paucity of studies, especially *in vivo*, the small sample sizes used in most of the studies, and the different types and doses of caffeine doses used made it difficult to establish solid conclusions, as the benefits of caffeine to enhance muscle strength were present in some but not all studies [1–3]. At that time, most of the studies tested caffeine properties *in vitro* using animal muscle tissues [1,2,4–7]. These *in vitro* studies reported the effects of caffeine on muscle performance including enhanced contractile status, potentiation of the rate of substrate utilization, facilitation of neuromuscular transmission, and alteration of Ca²⁺ permeability and release in the sarcoplasmic reticulum [1,2]. Nevertheless, empirical studies *in vivo* in humans were scarce and so, it was difficult to translate the benefits of animal research to human performance. As a result, systematic reviews argued that it was possible that the caffeine-induced increases in muscle contractility seen *in vitro* did not translate into improved strength *in vivo* [3].

However, the status of caffeine as a substance with a potential ergogenic effect for strength performance started to change at the beginning of the new century. In the first

decade of the 21st century, several systematic reviews pointed to several benefits of acute caffeine intake on anaerobic performance, including strength, although authors still suggested that the paucity and contradictory results of studies until that date impeded a clear categorization of caffeine as an ergogenic aid for strength performance [8–10]. For example, studies examining the effect of caffeine on isokinetic peak torque, isometric maximal force, muscular endurance for upper body musculature, and one-repetition maximum (1RM) showed equivocal results, with caffeine having a minimal ergogenic effect within these areas [10]. However, studies suggested that caffeine could enhance contractility through local actions in the skeletal muscle itself continuing with the view of the previous decades [8–11]. Indeed, at the end of the first decade of the century, results continued equivocal, and implications of the ergogenic potential remained unclear.

Currently, there is solid evidence supporting that acute caffeine intake (habitually from 3 to 9 mg/kg) increases maximal muscle strength, power output, and strength endurance. The categorization of caffeine as an ergogenic aid for muscle performance is based upon dozens of original studies carried out in the last years, and subsequent systematic reviews that concluded that caffeine ingestion improves 1RM, isometric and isokinetic strength, the rate of force development as well as muscular endurance, velocity, and power in different resistance exercises [12–17]. Indeed, an umbrella review of 21 published meta-analyses [18] that determined the effect of caffeine in several conditions associated to exercise showed an ergogenic effect of caffeine on muscle strength among other conditions. Not only the status of caffeine as an ergogenic aid for muscle strength has changed in the last years; the main mechanism associated with caffeine's ergogenicity in all-out exercise situations has been shifted from local (within the muscle) to central (within the central nervous system). As indicated above, seminal studies on the effect of caffeine on muscle performance hypothesized that the ergogenic effect of caffeine could be attributable (almost in part) to peripheral factors by increased sarcoplasmic reticulum calcium ion release and increased muscle contractility [1,2]. Nowadays, it has been suggested that to obtain such an effect within the muscle with caffeine, there are needed doses of caffeine that would be toxic for humans [19]. On the other hand, the assumption that caffeine's ergogenicity is associated with the binding capacity of caffeine to block adenosine receptors (impeding the fatiguing effect of adenosine on the central nervous system) [20,21] and the caffeine-induced increase in motor-unit recruitment [11,22] are the main hypotheses of experts in the field to explain the benefit of caffeine on exercise situations that imply maximal strength production [13].

Nowadays, caffeine is widely consumed in the sports context, irrespective of the type of sport or the fitness level of the athlete. According to the caffeine concentrations of urine samples obtained for doping analysis in national and international competitions held in Spain, three out of four elite athletes consumed this substance before or during sports competitions [23]. Although there is a trend for higher urine caffeine concentrations in sports with an aerobic nature, the presence of urine is common in all types of sports, including those where maximum strength/power is key for performance such as weightlifting and judo [23]. The wide use of caffeine as a performance-enhancing substance in sports is probably linked to the solid evidence that supports the ergogenic effect of caffeine on a spectrum of exercise situations [12,13,18,24], including aerobic [13,18] and anaerobic [13–15,25] performance. Nevertheless, the knowledge about caffeine's ergogenicity in exercise and sport has come a long way to be where it is nowadays, as seminal investigations did not report the ergogenic effect of caffeine on strength performance [1–3]. Many potential factors could be responsible for the winding path on this topic of research. Differences in study designs, such as participants' characteristics (age, sex, training status, habitual caffeine consumption), sample size, caffeine dose, the timing of ingestion, caffeine form of administration, or successful blinding of caffeine ingestion, among others, have likely propitiated the evolution in the evidence on caffeine as an ergogenic aid for strength performance in the last decades. From a historical perspective, analyzing evolution in these key design variables could be interesting to better comprehend the current state of the art regarding

caffeine's ergogenic benefits on strength. The purpose of this overview review was to describe the evolution of the characteristics of the research on caffeine ergogenic effects on strength, focusing on participants' attributes, experimental designs, and caffeine dose and form of administration employed. Outcomes about the ergogenic effects of caffeine on strength performance are out of the scope of this overview review, as they had been well established in previous systematic reviews and meta-analyses [2,5–7,20].

2. Materials and Methods

2.1. Search Strategy

The search for published studies on the topic was conducted in the databases PubMed, Scopus and Web of Science (WoS) on 10 January 2023, and it included all research published until 31 December 2022, with no year restriction. Search terms included free-text words for key concepts related to caffeine and strength performance. The full search criteria for the PubMed database was: (caffeine[Title/Abstract] OR energy drink[Title/Abstract] OR coffee[Title/Abstract] OR caffeinated[Title/Abstract]) AND (resistance exercise[Title/Abstract] OR muscle development[Title/Abstract] OR muscle strength[Title/Abstract] OR "strength training"[Title/Abstract] OR "muscle hypertrophy"[Title/Abstract] OR "power production"[Title/Abstract] OR "maximal strength"[Title/Abstract] OR "peak power"[Title/Abstract] OR plyometric[Title/Abstract] OR "force production"[Title/Abstract] OR "resistance training"[Title/Abstract] OR MVC[Title/Abstract] OR "muscle power"[Title/Abstract] OR "maximal voluntary contraction"[Title/Abstract] OR 1RM[Title/Abstract] OR "1-repetition maximum"[Title/Abstract]). Full search criteria for Scopus and WoS can be found in Supplementary 1. The search results were downloaded to a Microsoft Excel spreadsheet (Microsoft Corporation, Redmond, WA, USA) and subsequently filtered. Titles and abstracts were then screened for a later full-text review. The search for published studies was independently performed by two authors (VGC and JJS) and disagreements were resolved through discussion. A secondary search was performed by conducting forward citation tracking of reviews and meta-analyses on caffeine and strength.

2.2. Inclusion and Exclusion Criteria

To warrant inclusion in the current analysis, potential studies were required to meet the following criteria: (a) experimental trial; (b) carried out in human participants of either sex (or samples including participants of both sexes) and at all age groups; (c) used healthy participants without known chronic disease or injury; and (d) studies on the effects of oral caffeine intake on variables associated to strength performance. Systematic reviews and meta-analyses were excluded, in addition to those original studies with no full-text available, nor peer-reviewed articles, opinion pieces, commentaries, case reports, and editorials. Conference proceedings and poster presentations were also excluded, as it was unfeasible to certify the review process and to avoid duplication with original studies. Figure 1 depicts the details of the study selection methodology. After the removal of duplicates and the application of inclusion/exclusion criteria, a total of 189 studies were included in this review.

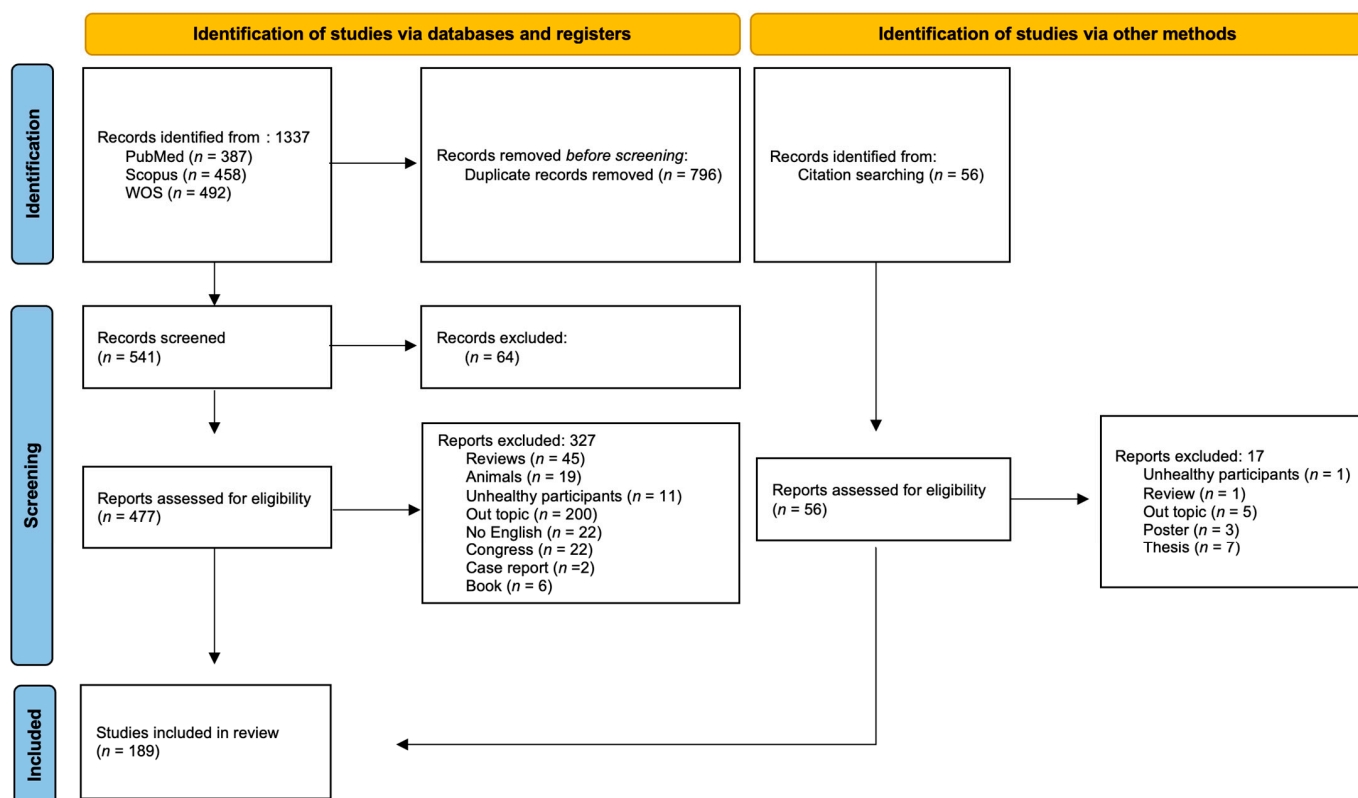


Figure 1. Flow diagram of the search and selection process.

2.3. Data Extraction

Once the inclusion/exclusion criteria were applied, the following information was tabulated on a predefined coding spreadsheet independently by two authors (VGC and JJS) using Microsoft Excel (Supplementary 2): (a) author(s), title and year of publication; (b) sample size, participants' sex and age; (c) caffeine form and dosage; (d) whether the experiment included an absolute (in mg) or body mass-adjusted dose of caffeine (mg/kg) and whether it was a single dose or a dose–response study; (e) whether caffeine was administered purely (e.g., caffeine anhydrous) or in a supplement or foodstuff that contained other substances (e.g., coffee, energy drinks, etc.); (f) habitual caffeine intake of the participants; and (g) reported side effects. Subsequently, disagreements were resolved through discussion until a consensus was achieved. Studies were grouped by the year of publication using the following groups: before 1980, 1980–1999, 2000–2009, 2010–2014 and 2015–2022. This grouping was created to offer a historical perspective of the studies published on the topic but increasing the sensitivity in the last years, as there has been a higher number of studies published.

2.4. Statistical Analyses

All the data were analyzed with the statistical package Jamovi v.2.3 [26]. Quantitative variables are reported as mean \pm standard deviation (SD). Absolute and relative frequencies were calculated to describe qualitative variables. Crosstabs with chi-square statistics were calculated to analyze differences between groups in qualitative variables. The Kolmogorov–Smirnov test was used to confirm the normality of the quantitative variables. Kruskal–Wallis tests were used to analyze differences between years-groups in quantitative variables as they had no normal distribution. The significance level was set at $p < 0.05$.

3. Results

3.1. Main Search

Figure 1 depicts the flow diagram of the search and the screening process. The initial search yielded 1337 studies. After the duplicates were removed, 541 studies were entered for the title and abstract screening. Subsequently, 477 items were selected for full-text review, with 327 excluded for the following reasons: 45 were reviews, 19 were conducted in animals, 11 were included samples of participants with a known disease, 200 were out of the scope of this review (i.e., lack of variables associated to strength performance), 22 were not written in English and 30 were congress abstracts, case reports or books. In addition, 56 records were identified through the search of citations included in reviews and meta-analyses on caffeine and strength, of which 17 were excluded for the following reasons: one was carried out in a sample of participants with a known disease, one was a systematic review, five did not include measurements on strength performance variables, three were poster presentations and seven were doctoral theses. Finally, a total of 189 studies analyzing the potential ergogenic effect of caffeine on strength performance were included in this overview review.

Participants. Within the studies included in the review, there was a total of 3459 participants (2606 males, 676 females, five papers did not inform about participants' sex [27–31], and it was unfeasible to ascertain the gender of 177 participants). The mean sample size was 18.3 ± 13.0 participants (median = 15), with a larger number of men than women (14.2 ± 11.9 men/study vs. 3.7 ± 7.0 women/study, respectively), being the median of 13 participants for men's studies and 0 participants for women's studies (Figure 2). Overall, 68.3% (129) of the studies did not include any female participants, while only 12.2% (23) of the studies did not include male participants. The most frequent sample size was between 11 and 15 participants (71; 37.6%), while 85.7% of studies included between six and 25 participants. Most of the studies were performed including young adults, with mean ages between 18 and 35 years. Only five studies employed participants with a mean age lower than 18 years [30,32–35], one with middle-aged women [36], and two with older people [37,38]. Two papers did not show data on participants' age [39,40]. According to training status, 6 (3.2%) papers described participants as untrained, 19 (10.1%) papers described participants as active, and 137 (72.5%) indicated some level of training. Three studies (1.6%) mixed trained and untrained participants [41–43] and 24 (12.7%) did not inform about the participants' training status.

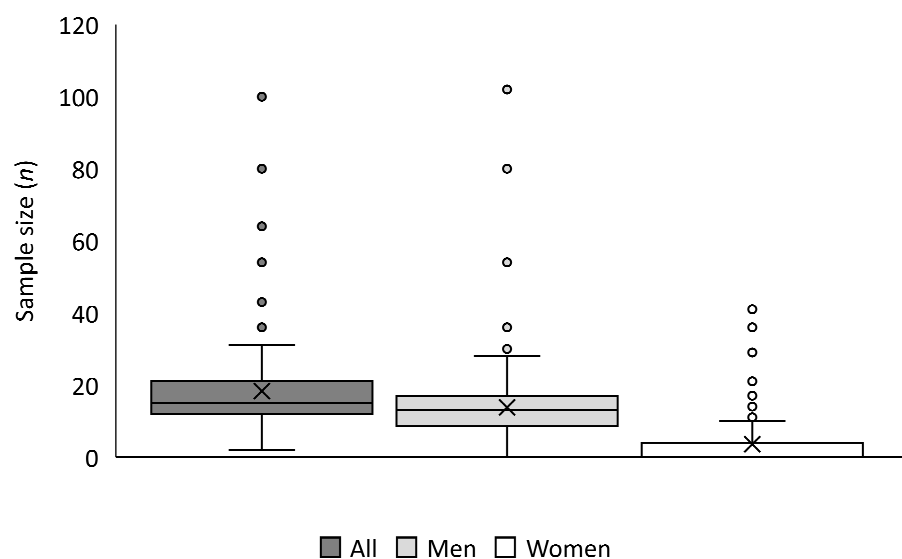


Figure 2. Number of papers published according to sample size and participants' gender.

Caffeine supplementation. Figure 3 (panel a) depicts that 72.0% (136) of the studies used body mass-adjusted caffeine doses (unique dose or dose–response design). Studies

with a body mass-adjusted and a single dose of caffeine (61.4%; 116) used a mean dose of 4.8 ± 1.4 mg/kg (range from 1.7 to 7 mg/kg). In addition, 20 (10.6%) studies compared more than one body mass-adjusted dose of caffeine in a dose–response design, including from low to high doses (ranging from 1 to 12 mg/kg). In contrast, 28.0% (53) of studies used an absolute dose of caffeine for all participants, ranging from low doses of 50 to 800 mg. In studies with a single absolute dose of caffeine, the mean value employed was 276.1 ± 134.0 mg (four studies did not show the fix-dosage used) [41,44–46]. Only four (2.1%) studies compared different fixed dosages, including low to high doses (from 100 to 750 mg). From the total, 73.0% (138) of studies used caffeine in a pure/isolated form (Figure 3, panel b). Only 10.1% (19) of studies analyzed the interaction of caffeine with other co-ingested substances (Figure 3, panel c). Approximately half of the studies used caffeine in capsules (51.9%, 98), while 41.3% (78) used caffeine-containing beverages.

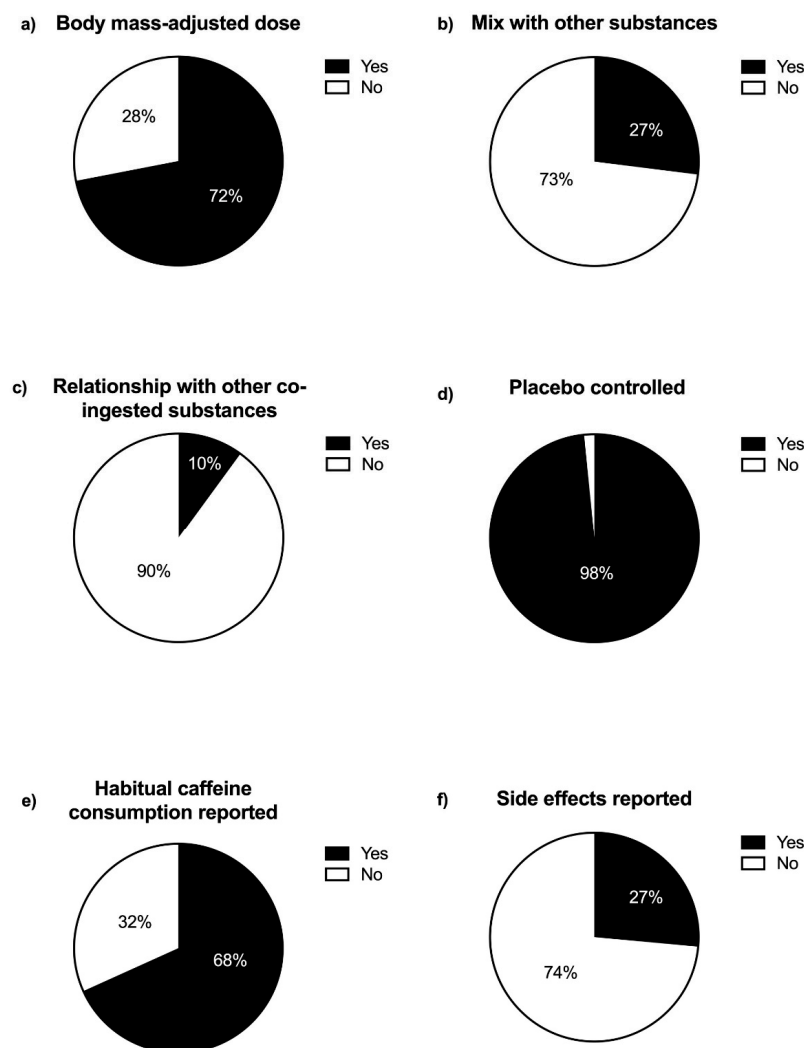


Figure 3. Frequency of studies published on the effect of caffeine on strength performance according to the use (or not) of a body-mass adjusted dose of caffeine (a), a combination of caffeine with other substances (b), whether a relationship with other co-ingested substances (c), employed a placebo-controlled situation (d), reported participants' habitual caffeine consumption (e), and reported caffeine-associated side effects (f).

Study design and other outcomes are measured. Almost all the analyzed studies (98.4%, 186) used a placebo-controlled design (Figure 3, panel d), and 68.3% (129) of the studies reported participants' daily caffeine consumption (Figure 3, panel e). However, the study of the side effects produced by caffeine ingestion was registered only in 26.5%

(50) of studies (Figure 3, panel f). Overall, upper and lower body strength has been similarly investigated, with 24.9% (47) papers analyzing only upper body strength, 37.6% (71) focusing on only lower body strength, and 37.6% (71) including both upper and lower body strength exercises.

3.2. Temporal Analysis

The first paper included in this review data was from 1907. However, research about caffeine and strength performance was scarce in the 20th century. Most of the research on this topic has been published in the 21st century (94.2%, 178). Our data showed that only three studies (1.6%) were included before 1980; eight studies (4.2%) were published between 1980 and 1999; 18 (9.5%) were published between 2000 and 2009, 29 (15.3%) were published between 2010 and 2014; and 131 studies (69.3%) were published between 2015 and 2022. Table 1 shows the temporal evolution of samples, doses, and methodological characteristics of studies related to the effects of caffeine on strength performance.

Table 1. Evolution of the main characteristics of the experimental designs of investigations on caffeine effects on strength performance.

Variables		<1980	1980–1999	2000–2009	2010–2014	2015–2022
n papers		3 (1.6%)	8 (4.2%)	18 (9.5%)	29 (15.3%)	131 (69.3%)
	<i>n</i>	2.3 ± 0.6	15.5 ± 10.7	15.7 ± 6.9	16.0 ± 7.8 *	19.7 ± 14.4 *
Sample size	<i>n</i> Male	2.3 ± 0.6	14.7 ± 7.0	13.8 ± 5.6	13.8 ± 6.7	14.6 ± 13.6
	<i>n</i> Female	0	2.3 ± 6.0	1.9 ± 4.4	1.3 ± 3.4	4.6 ± 7.8
Adjusted dose	Yes	0 (0%)	5 (62.5%)	14 (77.8%)	20 (69.0%)	96 (73.3%)
	No	3 (100%)	3 (37.5%)	4 (22.2%)	9 (31.0%)	35 (26.7%)
Dose–response	Yes	0 (0%)	2 (25.0%)	0 (0%)	2 (6.9%)	20 (15.3%)
	No	3 (100%)	6 (75.0%)	18 (100%)	27 (93.1%)	111 (84.7%)
Dose	Adjusted (mg/kg)	–	5.8 ± 0.8	5.2 ± 1.3	4.6 ± 1.5	4.8 ± 1.6
	Absolute (mg)	300	437.9 ± 69.0	180.3 ± 90.6	226.1 ± 95.9	298.3 ± 142.4
Mix with other substances	Yes	1 (33.3%)	1 (12.5%)	6 (33.3%)	16 (55.2%)	27 (20.6%)
	No	2 (66.7%)	7 (87.5%)	12 (66.7%)	13 (44.8%)	104 (79.4%)
Relationship with other co-ingested substances	Yes	0 (0%)	0 (0%)	2 (11.1%)	2 (6.9%)	15 (11.5%)
	No	3 (100%)	8 (100%)	16 (88.9%)	27 (93.1%)	116 (88.5%)
Placebo-controlled design	Yes	2 (66.7%)	8 (100%)	18 (100%)	28 (96.6%)	130 (99.2%)
	No	1 (33.3%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (3.4%)	1 (0.8%)
Caffeine consumption reported	Yes	0 (0%)	5 (62.5%)	13 (72.2%)	19 (65.5%)	92 (70.2%)
	No	3 (100%)	3 (37.5%)	5 (27.8%)	10 (34.5%)	39 (29.8%)
Reported side effects	Yes	0 (0%)	1 (12.5%)	6 (33.3%)	10 (34.5%)	33 (25.2%)
	No	3 (100%)	7 (87.5%)	12 (66.7%)	19 (65.5%)	98 (74.8%)
	Capsule	1 (33.3%)	4 (50.0%)	11 (61.1%)	9 (31.0%)	73 (55.7%)
	Beverage	1 (33.3%)	4 (50.0%)	7 (38.9%)	20 (69.0%)	46 (35.1%)
	Gum	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	3 (2.3%)
Caffeine form	Mouth rinse	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	5 (3.8%)
	Gel	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (0.8%)
	Various forms	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	1 (0.8%)
	N/A	1 (33.3%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	2 (1.5%)
Exercise test	Upper	2 (66.7%)	1 (12.5%)	5 (27.8%)	8 (27.6%)	31 (23.7%)
	Lower	1 (33.3%)	7 (87.5%)	8 (44.4%)	7 (24.1%)	48 (36.6%)
	Both	0 (0%)	0 (0%)	5 (27.8%)	14 (48.3%)	52 (39.7%)

Data indicate the number of studies that fulfilled (or did not) each methodological criterion, with percentages between parentheses. * indicates a significant differences with data <1980 ($p < 0.05$).

Participants. The sample size was similar among the year groups established for this review, except for <1980 with respect to 2010–2014 and 2015–2022 ($p < 0.05$) with lower sample sizes before 1980. The mean number of male participants was 2.3 ± 0.6 , and there were no female participants in studies before 1980. Between 1980 and 1999, the mean number of male participants was 14.7 ± 7.0 and 2.3 ± 6.0 for female participants. Between 2000 and 2009, mean values for male and female participants were 13.8 ± 5.6 and 1.9 ± 4.4 , respectively. Between 2010 and 2014, mean values for male and female participants were 13.8 ± 6.7 and 1.3 ± 3.4 participants and mean values between 2015 and 2022 were 14.6 ± 13.6 and 4.6 ± 7.8 participants, respectively.

Caffeine supplementation. Except for studies before 1980, studies employing body mass-adjusted doses were the most common (from 62.5% to 77.8%; $p = 0.07$). Studies with dose–response designs were lower in number with respect to those that used a single

dose of caffeine in all the year groups included in this review. The higher proportions of dose–response designs were found in 1980–1999 (25.0%, 2) and 2015–2022 (15.3%, 20) although without significant differences with respect to the other year groups ($p = 0.21$). Studies from 1980 to 1999 used the greater mean doses in both body mass-adjusted doses of caffeine (5.8 ± 0.8 mg/kg) and fixed doses of caffeine (437.9 ± 69.0 mg). There were no significant differences in the doses of caffeine employed over time in studies with adjusted-to-body-mass doses of caffeine or studies with a fixed dose ($p > 0.05$). There were significant differences in the use of isolated vs. mixed forms of caffeine administration among the year groups ($p < 0.01$). In all year groups, except for 2010–2014, the effect of caffeine was mostly investigated in an isolated form, ranging from 66.7% to 87.5%. However, for the 2010–2014 period, only 44.8% of studies used pure caffeine administration. Overall, only a few studies (about 10%, except for studies before 2000 where there were no studies; $p = 0.76$) analyzed the potential interaction of caffeine with other substances in multi-ingredient studies. The temporal evolution of the methodological characteristics was also reflected in the form in which caffeine was ingested in the studies. Overall, the results showed that capsules or tablets were the most used form of administration (51.9%, 98); the second most used form of administration was through beverages (coffee, energy drinks, or caffeine powder dissolved in liquid, 41.3%, 78). Since 2015, other forms of caffeine administration have appeared, such as gels (0.8%, one study) [47], chewing gum (2.3%, three studies) [48–50], and mouth rinse (3.8%, five studies). The studies before 2000 analyzed to a greater extent the effect of caffeine on exercise that implied lower body strength, while in the remaining year groups, there was a comparable proportion of studies on both lower and upper body strength ($p = 0.05$).

Study design and other outcomes measured. The results showed that over time, almost all of the studies were placebo-controlled experiments, except in the studies before 1980 ($p < 0.01$). Before 1980, no studies reported habitual caffeine consumption or side effects. After 1980, approximately two out of three studies included information about participants' daily caffeine consumption ($p = 0.13$), but only a minority (27.5%) reported side effects ($p = 0.50$). Until 2000, studies performed on the upper body were scarce (only three studies), but this situation changed in the subsequent years with 44 new studies (total 47; 24.9%) on caffeine's effects on upper body strength performance and 71 studies (37.6%) on both upper and lower body strength performance ($p = 0.05$). In the last years, a similar proportion of lower and upper body studies have been performed.

4. Discussion

The purpose of this overview review was to describe the evolution of the characteristics of the research on caffeine ergogenic effects on strength, focusing on participants' attributes, experimental designs, and caffeine dose and form of administration employed. The principal results of this review show an increasing interest in the effect of caffeine on strength performance in the last years, at least in the number of studies published. Additionally, most of the research on this topic used placebo-controlled experiments, which were performed in samples of 20 or fewer young adults (18 to 35 years old) with a certain level of training. Although the tendency is changing slowly in the last years, still males are feature several times more frequently than women in samples of these studies. Most of the investigations used isolated caffeine in capsules, and the dose is adjusted to the participant's body mass (on average, ~ 5 mg/kg). The inclusion of measurements to report the habitual caffeine intake of participants is relatively common, especially in the last years, but the inclusion of assessments about caffeine-induced side effects during and after exercise is still included in a small proportion of studies.

Throughout history, there have been no relevant changes in the research designs employed to determine the ergogenic effect of caffeine on strength performance (except for the seminal studies) nor about the doses of caffeine used in these experiments. Therefore, we believe that the lack of evidence on the effects of caffeine on strength performance up to the beginning of the 21st century [8–10] was based on the scarcity of studies carried out up to that time. Reviews performed in the early 2000s argued that evidence on caffeine's

potential benefit on strength-based exercise was in its infancy but was promising [8]. Indeed, some years after, Burke [9] and Davis [10] reported that studies examining caffeine's effect on strength outcomes showed equivocal results, with caffeine having minimal ergogenic effect on this type of exercise. Nowadays, there is solid evidence about the ergogenic effects of caffeine on strength performance. The high volume of publications in the last decade has facilitated multiple systematic reviews [15,16], which have highlighted the positive effects of caffeine on strength performance.

The use of caffeine supplementation to improve physical performance in humans is not a new field of study. Although a few investigations were carried out to demonstrate the benefits of caffeine in German laboratories toward the end of the 19th century [51], we can assume that the beginning of the experimentation on caffeine's ergogenicity in humans was set in the early 1900s. In 1907, Rivers and Webber [39] were the first researchers interested in the effects of caffeine on muscular performance. These researchers studied the effect of caffeine on themselves, including a placebo trial and a blinding protocol (never performed before that date) to isolate the effect of caffeine on human performance over other confounding variables. This pioneering work reported an increase in the capacity for muscular work with a dose of 300 mg of caffeine citrate, but the increase was of different magnitude between the only two participants included in the study. Afterwards, Hyde and Root in 1917 [41] analyzed two healthy men, who did more than twice as much work on the ergograph when ingesting caffeine. In 1939, Thornton et al. [40] reported an increase in performance in reaction time, tapping tests, hand grip strength, and maintained hand grip with a dose of 300 mg of caffeine compared to a placebo ($n = 3$). Although these seminal works used adequate experimental designs with controls such as previous exercise, time of the day, or the use of placebo trials, few investigations of caffeine occurred before the 1980s, and sample sizes were too small to establish unequivocal conclusions. Consequently, the effect of oral intake of caffeine on muscle strength was considered as poorly studied, and the ergogenic effects of caffeine were rejected in the 1980s [1–3]. In addition, caffeine was catalogued as a banned substance in sports (prohibited only in competition) by anti-doping authorities between 1984 and 2004. A high threshold (12 $\mu\text{g}/\text{mL}$) for urine caffeine concentration was set in 1987 to limit the use of high doses of caffeine, and only athletes that surpassed this threshold were penalized for doping misconduct. Maybe, the consideration of caffeine as a doping agent led to lower research about caffeine and strength performance. In the two decades that caffeine was considered a banned substance, only nine studies were published on this topic. In 2004, the World Anti-Doping Agency decided to remove caffeine from the list of banned substances, and since then, athletes have been able to consume caffeine in any form freely. However, the use of caffeine in athletes of strength-based sports disciplines just after the removal of caffeine from the list of banned substances was low [52], as there was no evidence to support its use. Interestingly, in the first decade after the removal of caffeine from the banned list (2005–2015), 58 studies were conducted on the effect of caffeine on strength performance. This increase in the research interest regarding the benefits of caffeine on strength was accompanied by increases in the use of caffeine in sports such as weightlifting, judo, and boxing, at least judged by the post-competition urinary concentrations of athletes of these disciplines between 2004 and 2015 [23]. Perhaps, the fact that the effects of caffeine continued to be contradictory even with the rise in research interests [8–10] led to an exponential increase in the number of publications on this topic afterwards.

Although there is a tendency for a higher interest in the potential benefits of caffeine in women, research analyzing the effect of caffeine on strength in women has been scarce. Most of the studies (68.3%) did not include women in their sample. In contrast, only 12.2% of studies not included men, and only 16.9% (32) of studies show the effect of caffeine on both sexes. Before the 2000s, only 16 women (vs. 110 men) had been included in strength-caffeine studies. Even, only 35 (vs. 248 men) in 2000–2009 and 35 (vs. 385 men) in the 2010–2014 periods were included in investigations on this topic. So, women are under-represented in the literature about caffeine and strength performance. From 1907 to 2014,

the presence of women is limited to 9.8%, but even between 2015 and 2022, it is only 22.9% of the total participants. The problem of the under-representation of women is not exclusive to caffeine research, as it has been described in other areas of sports sciences, although with little disparity [53]. Analyzing the three major sports sciences journals, Costello et al. [53] found that only 39% of participants in the studies published with samples of humans were women. Our data showed an even more biased effect and were consistent with previous research in the caffeine context of sports sciences [54]. Salinero et al. [54] analyzed a total of 362 original investigations about the effects of caffeine on physical performance. Their results showed that 703 participants were women from 5321 individuals, which represented only 13.2% of the total sample. In the same line, Grgic et al. [18] in their umbrella review found that in all the included meta-analyses, 72–100% of the pooled sample participants were men, suggesting that more primary studies should be conducted among women to improve the generalizability of the findings. Overall, although current research in other areas of sports sciences reflects that the magnitude of the ergogenic effect of caffeine is similar in men and women when the dose is standardized to body mass [55,56], and women obtain benefit from the caffeine in all phases of their menstrual cycle [57–59], more research is necessary to adequately establish the dose–response effect of caffeine on strength performance in active women and female athletes.

Interestingly, until 2015, only four studies employed dose–response designs to establish the association between caffeine amount and the magnitude of its ergogenic benefit on strength. In 1980, Bugyi [60], compared 167, 424 and 500 mg of caffeine, and in 1990 [46], Jacobson and Edwards compared 300 vs. 600 mg of caffeine. It was not until 2012 that the first dose–response study was performed with doses adjusted to the participant's body mass. Del Coso et al. [61] compared 1 and 3 mg/kg of caffeine, and one year later, Pallarés et al. [62] compared 3, 6, and 9 mg/kg of caffeine, both on exercise protocols of increasing load. Since then, 20 studies have compared doses between 1 and 12 mg/kg. Curiously, only studies with dose–response designs included doses lower than 1.7 mg/kg and higher than 7 mg/kg, suggesting that these dose–response studies are key to understanding the effect of low/high doses of caffeine on strength performance. Even with the presence of these studies, the identification of the dose that produces the highest performance benefit is complex, and it has to be helped by the study of meta-analytic findings. Nowadays, there is a consensus to consider that moderate doses (2–6 mg/kg) of caffeine are necessary to improve strength performance [13,16] with a similar benefit in terms of magnitude within this range. Doses higher than 6 mg/kg are also ergogenic for strength-related variables, but the prevalence of side effects habitually increases along with the dose [13,62,63].

As far as side effects are concerned, only a small proportion of studies about caffeine and strength performance have included the assessment of the frequency or magnitude of typical side effects as study variables (only 50 studies, 26.5%), even in the investigations of the last few years. This aspect is probably of greater interest in investigations associated with health outcomes after caffeine ingestion. However, the study of the benefits and drawbacks of caffeine in the sports context is key to establishing the convenience of caffeine supplementation in athletes. Only one study conducted in the 20th century included the measurement of caffeine-induced side effects as an aim of study, while the interest in side effects associated with caffeine supplementation in the sporting context has become more relevant in the last years. However, it is worth mentioning that systematic reviews had already established the safety of moderate doses of caffeine in sports (3 to 6 mg/kg), at least for healthy and active individuals [63]. The appearance and popularity of caffeinated energy drinks in the market of sports-related foodstuffs is another variable that may have led to this increase in the study of side effects over time, as this type of drinks has been considered harmful in other contexts, especially in younger individuals [64]. The intensive use that some populations have regarding caffeine drinks and foodstuffs (in and out of sport context), leading to the intake of high caffeine doses, may suggest the need to monitor the downsides of caffeine supplementation on the athlete, especially for those using doses > 6 mg/kg.

The study of caffeine properties on strength has included another topic of discrepancy over the years: the use of exercise located in muscles of the upper vs. lower body. Until 2010, only eight (27.6%) studies had employed protocols to assess caffeine's ergogenicity in the upper body strength, 16 (55.2%) assessed its effects on the lower body and five (17.2%) researchers had studied caffeine effects in both upper and lower body strength performance. In most recent years, this difference has disappeared as the proportion of studies investigating caffeine's ergogenicity in lower and upper body strength exercises is similar. Interestingly, almost 40% of the most recent studies included measurements of both the upper and lower body, which provides a more adequate context to compare the effect of caffeine on strength in exercises that involve different body parts. This interest in studying the potential differences in response to caffeine between upper and lower body exercise has been likely induced by older meta-analyses [65] that reported that the effect of caffeine in lower-body muscle groups is four- to six-fold greater than in upper-body muscle groups. On the other hand, Grgic et al. [15] have reported through a systematic review and meta-analysis that caffeine significantly improved upper but not lower body strength. Even in this context of different findings in meta-analyses, the current investigation shows a clear trend regarding the increase in investigations that study caffeine effects on strength performance in both upper and lower body exercise, which probably will solve current discrepancies shortly.

This study provides an overview of the scientific protocols used to study caffeine's effects on strength performance over time. The assessment of the methodological limitations or risk of bias of the investigations included in overview reviews is not usually performed [66], but future studies should analyze how the risk of bias in investigations about caffeine's properties on strength performance has changed over time. In this context, the current overview review presents some limitations that should be acknowledged. We have limited the search and description of studies' characteristics to studies on caffeine's effects on strength performance. Therefore, studies' attributes on caffeine's benefits on endurance or aerobic performance have not been analyzed. Future investigations should be carried out to determine how the experimental protocols have evolved to study caffeine's benefits on endurance-based exercise. We only included human healthy participants (regardless of age). Therefore, this analysis is not representative of people with some disease or injury. Future studies should perform a specific analysis for these types of populations, as it is possible that the methods employed to investigate caffeine properties in terms of caffeine dosage and the reporting of side effects are substantially different when including clinical populations.

5. Conclusions

The current review depicts that the interest in developing research on the effect of caffeine on strength exercises has increased in recent years, as per the number of studies published. However, since the 1980s, there have been no relevant changes in the methods used to investigate caffeine's benefits on strength. Overall, the current overview review indicates that the pattern in the study of caffeine's effects on strength performance has been carried out with experiments including 11–15 healthy adults, using a single and moderate dose of caffeine adjusted to participants' body mass (~5 mg/kg) in the form of a capsule, with placebo-controlled experimental design, and analyzing the effect of caffeine on the upper and lower body. With this overview review, it is possible to identify conceptual boundaries, such as the paucity of studies with doses of caffeine below 2 mg/kg or above 9 mg/kg, as well as identify gaps for future research, such as the study of the effects of caffeine on strength in women and older adults along with the identification of frequency and magnitude of caffeine-associated side effects.

Supplementary Materials: The following supporting information can be downloaded at: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/nu15051178/s1>, Supplementary 1: Full search criteria for databases; and Supplementary 2: Predefined coding spreadsheet of studies included in the review.

Author Contributions: Conceptualization and Methodology, V.G.-C., J.D.C. and J.J.S.; Formal Analysis, V.G.-C. and J.J.S.; Investigation, V.G.-C., J.D.C. and J.J.S.; Resources, V.G.-C.; Writing—Original Draft Preparation, V.G.-C.; Writing—Review and Editing, J.J.S., A.M. and J.D.C.; Supervision A.M., J.J.S. and J.D.C. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Acknowledgments: The authors of this investigation would like to acknowledge the labor of all the researchers that have conducted the investigations that allowed this overview review.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Powers, S.K.; Dodd, S. Caffeine and Endurance Performance. *Sports Med.* **1985**, *2*, 165–174. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Jacobson, B.H.; Kulling, F.A. Health and Ergogenic Effects of Caffeine. *Br. J. Sports Med.* **1989**, *23*, 34–40. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Williams, J.H. Caffeine, Neuromuscular Function and High-Intensity Exercise Performance. *J. Sports Med. Phys. Fit.* **1991**, *31*, 481–489.
4. Weber, A.; Herz, R. The Relationship between Caffeine Contracture of Intact Muscle and the Effect of Caffeine on Reticulum. *J. Gen. Physiol.* **1968**, *52*, 750–759. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Varagić, V.M.; Zugić, M. Interactions of Xanthine Derivatives, Catecholamines and Glucose-6-Phosphate on the Isolated Phrenic Nerve Diaphragm Preparation of the Rat. *Pharmacology* **1971**, *5*, 275–286. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Isaacson, A.; Sandow, A. Caffeine Effects on Radiocalcium Movement in Normal and Denervated Rat Skeletal Muscle. *J. Pharmacol. Exp. Ther.* **1967**, *155*, 376–388.
7. Lüttgau, H.C.; Oetliker, H. The Action of Caffeine on the Activation of the Contractile Mechanism in Striated Muscle Fibres. *J. Physiol.* **1968**, *194*, 51–74. [[CrossRef](#)]
8. Graham, T.E. Caffeine and Exercise: Metabolism, Endurance and Performance. *Sports Med.* **2001**, *31*, 785–807. [[CrossRef](#)]
9. Burke, L.M. Caffeine and Sports Performance. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2008**, *33*, 1319–1334. [[CrossRef](#)]
10. Davis, J.K.; Green, J.M. Caffeine and Anaerobic Performance: Ergogenic Value and Mechanisms of Action. *Sports Med.* **2009**, *39*, 813–832. [[CrossRef](#)]
11. Tarnopolsky, M.A. Effect of Caffeine on the Neuromuscular System—Potential as an Ergogenic Aid. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2008**, *33*, 1284–1289. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Baltazar-Martins, J.G.; Brito de Souza, D.; Aguilar, M.; Grgic, J.; Del Coso, J. Infographic. The Road to the Ergogenic Effect of Caffeine on Exercise Performance. *Br. J. Sports Med.* **2020**, *54*, 618–619. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Guest, N.S.; VanDusseldorp, T.A.; Nelson, M.T.; Grgic, J.; Schoenfeld, B.J.; Jenkins, N.D.M.; Arent, S.M.; Antonio, J.; Stout, J.R.; Trexler, E.T.; et al. International Society of Sports Nutrition Position Stand: Caffeine and Exercise Performance. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2021**, *18*, 5. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Raya-González, J.; Rendo-Urteaga, T.; Domínguez, R.; Castillo, D.; Rodríguez-Fernández, A.; Grgic, J. Acute Effects of Caffeine Supplementation on Movement Velocity in Resistance Exercise: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.* **2020**, *50*, 717–729. [[CrossRef](#)]
15. Grgic, J.; Trexler, E.T.; Lazinica, B.; Pedisic, Z. Effects of Caffeine Intake on Muscle Strength and Power: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2018**, *15*, 11. [[CrossRef](#)]
16. Grgic, J. Effects of Caffeine on Resistance Exercise: A Review of Recent Research. *Sports Med.* **2021**, *51*, 2281–2298. [[CrossRef](#)]
17. Grgic, J.; Mikulic, P. Effects of Caffeine on Rate of Force Development: A Meta-Analysis. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2022**, *32*, 644–653. [[CrossRef](#)]
18. Grgic, J.; Grgic, I.; Pickering, C.; Schoenfeld, B.J.; Bishop, D.J.; Pedisic, Z. Wake up and Smell the Coffee: Caffeine Supplementation and Exercise Performance—An Umbrella Review of 21 Published Meta-Analyses. *Br. J. Sports Med.* **2020**, *54*, 681–688. [[CrossRef](#)]
19. Neyroud, D.; Cheng, A.J.; Donnelly, C.; Bourdillon, N.; Gassner, A.-L.; Geiser, L.; Rudaz, S.; Kayser, B.; Westerblad, H.; Place, N. Toxic Doses of Caffeine are Needed to Increase Skeletal Muscle Contractility. *Am. J. Physiol. Cell Physiol.* **2019**, *316*, C246–C251. [[CrossRef](#)]
20. Aguiar, A.S.; Speck, A.E.; Canas, P.M.; Cunha, R.A. Neuronal Adenosine A2A Receptors Signal Ergogenic Effects of Caffeine. *Sci. Rep.* **2020**, *10*, 13414. [[CrossRef](#)]
21. McLellan, T.M.; Caldwell, J.A.; Lieberman, H.R. A Review of Caffeine’s Effects on Cognitive, Physical and Occupational Performance. *Neurosci. Biobehav. Rev.* **2016**, *71*, 294–312. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
22. Behrens, M.; Mau-Moeller, A.; Weippert, M.; Fuhrmann, J.; Wegner, K.; Skriptitz, R.; Bader, R.; Bruhn, S. Caffeine-Induced Increase in Voluntary Activation and Strength of the Quadriceps Muscle during Isometric, Concentric and Eccentric Contractions. *Sci. Rep.* **2015**, *5*, 10209. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
23. Aguilar-Navarro, M.; Muñoz, G.; Salinero, J.J.; Muñoz-Guerra, J.; Fernández-Álvarez, M.; Plata, M.D.M.; Del Coso, J. Urine Caffeine Concentration in Doping Control Samples from 2004 to 2015. *Nutrients* **2019**, *11*, 286. [[CrossRef](#)]
24. Salinero, J.J.; Lara, B.; Del Coso, J. Effects of Acute Ingestion of Caffeine on Team Sports Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Res. Sports Med.* **2019**, *27*, 238–256. [[CrossRef](#)]

25. Christensen, P.M.; Shirai, Y.; Ritz, C.; Nordsborg, N.B. Caffeine and Bicarbonate for Speed. A Meta-Analysis of Legal Supplements Potential for Improving Intense Endurance Exercise Performance. *Front. Physiol.* **2017**, *8*, 240. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. The Jamovi Project2022. Jamovi (Version 2.3). Available online: <https://www.jamovi.org> (accessed on 12 January 2023).
27. Kedia, A.W.; Hofheins, J.E.; Habowski, S.M.; Ferrando, A.A.; Gothard, M.D.; Lopez, H.L. Effects of a Pre-Workout Supplement on Lean Mass, Muscular Performance, Subjective Workout Experience and Biomarkers of Safety. *Int. J. Med. Sci.* **2014**, *11*, 116–126. [[CrossRef](#)]
28. Lopes, J.M.; Aubier, M.; Jardim, J.; Aranda, J.V.; Macklem, P.T. Effect of Caffeine on Skeletal Muscle Function before and after Fatigue. *J. Appl. Physiol.* **1983**, *54*, 1303–1305. [[CrossRef](#)]
29. Lopes-Silva, J.P.; da Rocha, A.L.S.; Rocha, J.C.C.; Silva, V.F.D.S.; Correia-Oliveira, C.R. Caffeine Ingestion Increases the Upper-Body Intermittent Dynamic Strength Endurance Performance of Combat Sports Athletes. *Eur. J. Sport Sci.* **2022**, *22*, 227–236. [[CrossRef](#)]
30. Spineli, H.; Pinto, M.P.; Dos Santos, B.P.; Lima-Silva, A.E.; Bertuzzi, R.; Gitaí, D.L.G.; de Araujo, G.G. Caffeine Improves Various Aspects of Athletic Performance in Adolescents Independent of Their 163 C > A CYP1A2 Genotypes. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2020**, *30*, 1869–1877. [[CrossRef](#)]
31. Suksuwan, C.; Phoemsapthawee, J.; Tumnark, P. Effects of a Low-Dose of Caffeine Co-Ingestion with Carbohydrate on Muscular Strength, Power, and Anaerobic Performance in Combat Sports Athletes. *J. Exerc. Physiol. Online* **2022**, *25*, 26–38.
32. Turley, K.; Eusse, P.A.; Thomas, M.M.; Townsend, J.R.; Morton, A.B. Effects of Different Doses of Caffeine on Anaerobic Exercise in Boys. *Pediatr. Exerc. Sci.* **2015**, *27*, 50–56. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
33. Arazi, H.; Hoseinihaji, M.; Eghbali, E. The Effects of Different Doses of Caffeine on Performance, Rating of Perceived Exertion and Pain Perception in Teenagers Female Karate Athletes. *Braz. J. Pharm. Sci.* **2016**, *52*, 685–692. [[CrossRef](#)]
34. Arazi, H.; Najafdari, A.; Eghbali, E. Effect of Big Bear Energy Drink on Performance Indicators, Blood Lactate Levels and Rating of Perceived Exertion in Elite Adolescent Female Swimmers. *Prog. Nutr.* **2016**, *18*, 403–410.
35. Arazi, H.; Rakhshanfar, S.; Eghbali, E.; Suzuki, K. Acute Influence of Caffeinated Commercially Available Energy Drinks on Performance, Perceived Exertion and Blood Lactate in Youth Female Water Polo Players: Energy Drinks on Performance of Water Polo Players. *Prog. Nutr.* **2021**, *23*, e2021220. [[CrossRef](#)]
36. Waer, F.B.; Laatar, R.; Jouira, G.; Srihi, S.; Rebai, H.; Sahli, S. Functional and Cognitive Responses to Caffeine Intake in Middle-Aged Women are Dose Depending. *Behav. Brain Res.* **2021**, *397*, 112956. [[CrossRef](#)]
37. Tallis, J.; Duncan, M.J.; Wright, S.L.; Eyre, E.L.J.; Bryant, E.; Langdon, D.; James, R.S. Assessment of the Ergogenic Effect of Caffeine Supplementation on Mood, Anticipation Timing, and Muscular Strength in Older Adults. *Physiol. Rep.* **2013**, *1*, e00072. [[CrossRef](#)]
38. Norager, C.B.; Jensen, M.B.; Madsen, M.R.; Laurberg, S. Caffeine Improves Endurance in 75-Yr-Old Citizens: A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled, Crossover Study. *J. Appl. Physiol.* **2005**, *99*, 2302–2306. [[CrossRef](#)]
39. Rivers, W.H.; Webber, H.N. The Action of Caffeine on the Capacity for Muscular Work. *J. Physiol.* **1907**, *36*, 33–47. [[CrossRef](#)]
40. Thornton, G.R.; Holck, H.G.O.; Smith, E.L. The Effect of Benzedrine and Caffeine upon Performance in Certain Psychomotor Tasks. *J. Abnorm. Soc. Psychol.* **1939**, *34*, 96–113. [[CrossRef](#)]
41. Hyde, I.H.; Root, C.B.; Curl, H. A Comparison of the Effects of Breakfast and of Caffeine on Work in an Athlete and a Non-Athlete. *Am. J. Physiol.-Leg. Content* **1917**, *43*, 371–394. [[CrossRef](#)]
42. Brooks, J.H.; Wyld, K. Acute Effects of Caffeine on Strength Performance in Trained and Untrained Individuals. *J. Athl. Enhanc.* **2015**, *4*. [[CrossRef](#)]
43. Berjisian, E.; Naderi, A.; Mojtahedi, S.; Grgic, J.; Ghahramani, M.H.; Karayigit, R.; Forbes, J.L.; Amaro-Gahete, F.J.; Forbes, S.C. Are Caffeine's Effects on Resistance Exercise and Jumping Performance Moderated by Training Status? *Nutrients* **2022**, *14*, 4840. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
44. Martinez, N.; Campbell, B.; Franek, M.; Buchanan, L.; Colquhoun, R. The Effect of Acute Pre-Workout Supplementation on Power and Strength Performance. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2016**, *13*, 29. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Tinsley, G.M.; Urbina, S.; Mullins, J.; Outlaw, J.; Hayward, S.; Stone, M.; Foster, C.; Wilborn, C.; Taylor, L. Influence of A Thermogenic Dietary Supplement on Safety Markers, Body Composition, Energy Expenditure, Muscular Performance and Hormone Concentrations: A Randomized, Placebo-Controlled, Double-Blind Trial. *J. Sports Sci. Med.* **2017**, *16*, 459–467.
46. Ormsbee, M.J.; Mandler, W.K.; Thomas, D.D.; Ward, E.G.; Kinsey, A.W.; Simonavice, E.; Panton, L.B.; Kim, J.-S. The Effects of Six Weeks of Supplementation with Multi-Ingredient Performance Supplements and Resistance Training on Anabolic Hormones, Body Composition, Strength, and Power in Resistance-Trained Men. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2012**, *9*, 49. [[CrossRef](#)]
47. Venier, S.; Grgic, J.; Mikulic, P. Caffeinated Gel Ingestion Enhances Jump Performance, Muscle Strength, and Power in Trained Men. *Nutrients* **2019**, *11*, 937. [[CrossRef](#)]
48. Venier, S.; Grgic, J.; Mikulic, P. Acute Enhancement of Jump Performance, Muscle Strength, and Power in Resistance-Trained Men After Consumption of Caffeinated Chewing Gum. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* **2019**, *14*, 1415–1421. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
49. Dittrich, N.; Serpa, M.C.; Lemos, E.C.; De Lucas, R.D.; Guglielmo, L.G.A. Effects of Caffeine Chewing Gum on Exercise Tolerance and Neuromuscular Responses in Well-Trained Runners. *J. Strength Cond. Res.* **2021**, *35*, 1671–1676. [[CrossRef](#)]
50. Ratamess, N.A.; Bush, J.A.; Kang, J.; Kraemer, W.J.; Stohs, S.J.; Nocera, V.G.; Leise, M.D.; Diamond, K.B.; Faigenbaum, A.D. The Effects of Supplementation with P-Synephrine Alone and in Combination with Caffeine on Resistance Exercise Performance. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2015**, *12*, 35. [[CrossRef](#)]
51. Weiss, B.; Laties, V.G. Enhancement of Human Performance by Caffeine and the Amphetamines. *Pharmacol. Rev.* **1962**, *14*, 1–36.

52. Del Coso, J.; Muñoz, G.; Muñoz-Guerra, J. Prevalence of Caffeine Use in Elite Athletes Following Its Removal from the World Anti-Doping Agency List of Banned Substances. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* **2011**, *36*, 555–561. [[CrossRef](#)]
53. Costello, J.T.; Bieuzen, F.; Bleakley, C.M. Where Are All the Female Participants in Sports and Exercise Medicine Research? *Eur. J. Sport Sci.* **2014**, *14*, 847–851. [[CrossRef](#)]
54. Salinero, J.J.; Lara, B.; Jiménez-Ormeño, E.; Romero-Moraleda, B.; Giráldez-Costas, V.; Baltazar-Martins, G.; Del Coso, J. More Research Is Necessary to Establish the Ergogenic Effect of Caffeine in Female Athletes. *Nutrients* **2019**, *11*, 1600. [[CrossRef](#)]
55. Skinner, T.L.; Desbrow, B.; Arapova, J.; Schaumberg, M.A.; Osborne, J.; Grant, G.D.; Anoopkumar-Dukie, S.; Leveritt, M.D. Women Experience the Same Ergogenic Response to Caffeine as Men. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2019**, *51*, 1195–1202. [[CrossRef](#)]
56. Lara, B.; Salinero, J.J.; Giráldez-Costas, V.; Del Coso, J. Similar Ergogenic Effect of Caffeine on Anaerobic Performance in Men and Women Athletes. *Eur. J. Nutr.* **2021**, *60*, 4107–4114. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
57. Romero-Moraleda, B.; Del Coso, J.; Gutiérrez-Hellín, J.; Lara, B. The Effect of Caffeine on the Velocity of Half-Squat Exercise during the Menstrual Cycle: A Randomized Controlled Trial. *Nutrients* **2019**, *11*, 2662. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
58. Lara, B.; Gutiérrez-Hellín, J.; García-Bataller, A.; Rodríguez-Fernández, P.; Romero-Moraleda, B.; Del Coso, J. Ergogenic Effects of Caffeine on Peak Aerobic Cycling Power during the Menstrual Cycle. *Eur. J. Nutr.* **2020**, *59*, 2525–2534. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
59. Lara, B.; Gutiérrez-Hellín, J.; Ruíz-Moreno, C.; Romero-Moraleda, B.; Del Coso, J. Acute Caffeine Intake Increases Performance in the 15-s Wingate Test during the Menstrual Cycle. *Br. J. Clin. Pharmacol.* **2020**, *86*, 745–752. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
60. Bugyi, G.J. The Effects of Moderate Doses of Caffeine on Fatigue Parameters of the Forearm Flexor Muscles. *Am. Correct. Ther. J.* **1980**, *34*, 49–53.
61. Del Coso, J.; Salinero, J.J.; González-Millán, C.; Abián-Vicén, J.; Pérez-González, B. Dose Response Effects of a Caffeine-Containing Energy Drink on Muscle Performance: A Repeated Measures Design. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* **2012**, *9*, 21. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
62. Pallarés, J.G.; Fernández-Eliás, V.E.; Ortega, J.F.; Muñoz, G.; Muñoz-Guerra, J.; Mora-Rodríguez, R. Neuromuscular Responses to Incremental Caffeine Doses: Performance and Side Effects. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2013**, *45*, 2184–2192. [[CrossRef](#)]
63. de Souza, J.G.; Del Coso, J.; Fonseca, F. de S.; Silva, B.V.C.; de Souza, D.B.; da Silva Gianoni, R.L.; Filip-Stachnik, A.; Serrão, J.C.; Claudino, J.G. Risk or Benefit? Side Effects of Caffeine Supplementation in Sport: A Systematic Review. *Eur. J. Nutr.* **2022**, *61*, 3823–3834. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
64. Seifert, S.M.; Schaechter, J.L.; Hershorin, E.R.; Lipshultz, S.E. Health Effects of Energy Drinks on Children, Adolescents, and Young Adults. *Pediatrics* **2011**, *127*, 511–528. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
65. Warren, G.L.; Park, N.D.; Maresca, R.D.; Mckibans, K.I.; Millard-Stafford, M.L. Effect of Caffeine Ingestion on Muscular Strength and Endurance: A Meta-Analysis. *Med. Sci. Sports Exerc.* **2010**, *42*, 1375–1387. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
66. Peters, M.D.J.; Godfrey, C.M.; Khalil, H.; McInerney, P.; Parker, D.; Soares, C.B. Guidance for Conducting Systematic Scoping Reviews. *Int. J. Evid.-Based Healthc.* **2015**, *13*, 141–146. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.



Caffeine Increases Muscle Performance During a Bench Press Training Session

by

Verónica Giráldez-Costas^{1,2}, Jaime González-García¹, Beatriz Lara¹, Juan Del Coso³,
Michal Wilk⁴, Juan José Salinero^{1,5}

Previous investigations have established the ergogenic effect of caffeine on maximal muscle strength, power output and strength-endurance. However, these investigations used testing protocols that do not replicate the structure of a regular strength training session. Thus, the aim of this study was to investigate the effect of acute caffeine ingestion on muscle performance during a simulated velocity-based training workout. In a double-blind, randomized and counterbalanced experiment, 12 participants performed two experimental trials after ingesting 3 mg/kg/b.m. of caffeine or a placebo. The trials consisted of 4 sets of 8 repetitions of the bench press exercise at 70% of their one-repetition maximum performed at maximal velocity. Bar velocity was recorded with a rotatory encoder and force, power output and work were calculated. Regarding the whole workout, caffeine increased mean bar velocity (+7.8%; $p=0.002$), peak bar velocity (+8.7%; $p=0.006$), mean force (+1.5%; $p=0.002$), mean power output (+10.1%; $p=0.003$) and peak power output (+8.2%; $p=0.004$) when compared to the placebo. The total work performed in the caffeine trial was superior to the placebo trial (7.01 ± 2.36 vs 6.55 ± 2.20 kJ, $p=0.001$). These results suggest that the acute intake of 3 mg/kg/b.m. of caffeine before a velocity-based strength workout increased muscle performance and the total work performed across the whole training session. Thus, caffeine can be considered as an effective strategy to enhance muscle performance during the bench press training sessions.

Key words: resistance exercise, muscle strength, strength training, exercise, ergogenic aid.

Introduction

Caffeine (1,3,7 trimethylxanthine) is a natural alkaloid with a potent ergogenic effect on several forms of exercise of maximum intensity (Grgic, Grgic, et al., 2019; Salinero et al., 2019). For this reason, this substance is commonly found in the post-competition urine samples of elite athletes (Aguilar-Navarro et al., 2019), suggesting a wide use of caffeine to increase sports performance. Among the sports with the highest urinary caffeine concentration is weightlifting, probably due to the high body of research that confirms the effects of caffeine on several aspects

of resistance-based exercise performance (Grgic, Sabol, et al., 2019). Briefly, there is ample evidence supporting that acute caffeine intake (habitually from 3 to 9 mg/kg/b.m.) increases maximal muscle strength (Diaz-Lara et al., 2016), power output (Mora-Rodríguez et al., 2015; Venier et al., 2019; Wilk et al., 2020) and strength-endurance (Diaz-Lara et al., 2016; Wilk et al., 2019). These same effects have been found in women (Fett et al., 2018; Romero-Moraleda, Del Coso, Gutiérrez-Hellín, and Lara, 2019) although research to date suggests that the magnitude of caffeine's ergogenicity on resistance exercise may be of

¹ - Camilo José Cela University. Exercise Physiology Laboratory. Madrid, Spain.

² - Autonomus University of Madrid. Department of Physical Education, Sport and Human Movement. Madrid, Spain.

³ - Rey Juan Carlos University. Centre for Sport Studies. Fuenlabrada, Spain.

⁴ - Institute of Sport Sciences, Jerzy Kukuczka Academy of Physical Education in Katowice, Poland.

⁵ - Castilla-La Mancha University. Faculty of Sport Sciences. Toledo, Spain.

lower magnitude than in men (Mielgo-Ayuso et al., 2019). Interestingly, acute caffeine intake causes a slightly different response to upper and lower body exercise (Tallis and Yavuz, 2018), while higher doses of caffeine may be needed for individuals habituated to caffeine (Wilk, Krzysztofik, et al., 2019b, 2019a), likely due to the progressive tolerance to the ergogenic effect of caffeine (Lara et al., 2019). On the contrary, the source of administered caffeine (e.g., coffee, energy drink, gel, etc) seems to have little effect on the ergogenic effect of this substance on resistance exercise performance (Del Coso et al., 2012; Richardson and Clarke, 2016; Venier et al., 2019).

Most of the research supporting the effect of caffeine on muscle performance during resistance exercise has used testing protocols that do not replicate the structure of a regular strength training workout. Traditionally, to assess caffeine's ergogenicity, a one-repetition maximum (1RM) protocol is used for maximal muscle strength (Wilk, Krzysztofik, et al., 2019b), a load-velocity curve for power output (Del Coso et al., 2012) and the number of repetitions performed with a submaximal load for strength-endurance (Grgic et al., 2020). To the author's knowledge, only two investigations have determined the effect of caffeine on simulated workouts of the bench press exercise. Salatto et al., (2020) investigated the effect of 9 mg/kg/b.m. of caffeine on muscle performance during 3 sets to failure with a load equivalent to 80% of 1RM. In that investigation, the participants completed a significantly higher number of repetitions during the normal and inclined bench press exercise with caffeine. Similarly, Rahimi, (2019) found that 6 mg/kg/b.m. of caffeine increased the number of repetitions during 3 sets to failure at 85% of 1RM, although in this investigation, only individuals with AA genotype in the CYP1A2 -1 63C>A polymorphism obtained the ergogenic effect of caffeine. However, repetition-to-failure workouts might not always be the optimum approach for resistance exercise training (Karsten et al., 2019). Furthermore, the use of velocity-based workouts with a given number of sets and repetitions is becoming an effective alternative to traditional resistance training (Martínez-Cava et al., 2020), while the evidence of caffeine's ergogenicity on this type of exercise is lacking. Thus, the aim of

this investigation was to determine the effect of acute caffeine intake on muscle performance variables during a bench press training session that included 4 sets of 8 repetitions at 70% 1RM performed at maximal velocity. We hypothesised that acute caffeine intake would increase muscle performance, especially in the last set of the bench press exercise protocol.

Methods

Participants

Twelve young and healthy participants (9 men and 3 women) volunteered to take part in the current study (age= 29±8 years, body mass= 72.2±9.8 kg, height= 1.75±0.07 m, body fat = 18.6±8.9 %). All of the participants fulfilled the following inclusion criteria: a) age between 18 and 45 years; b) low caffeine consumption (i.e., < 100 mg/day); c) previous resistance exercise training experience. Participants were excluded if they reported a) any type of upper body injury within the previous three months; b) positive smoking status; c) medication or dietary supplements usage within the previous month; d) previous history of cardiopulmonary diseases, e) oral contraceptive use; f) allergy to caffeine. Participants were included because they had been enrolled in a 4-week velocity-based training program of the bench press exercise and thus, they were familiarized with the experimental testing. Before enrolment in the study, all participants were fully informed of the experimental procedures and risks, and they all signed an informed written consent. The study was approved by the Camilo José Cela University Research Ethics Committee and was conducted in accordance with the last version of the Declaration of Helsinki.

Experimental Design

A double-blind, placebo-controlled randomized and counterbalanced experimental design was used in this investigation. Each participant took part in a pre-experimental session followed by two identical experimental trials separated by at least five days to allow complete recovery, testing reproducibility, and substances wash-out. The participants acted as their own controls to produce a crossover design with repeated measures. In the experimental trials, the participants ingested: (a) 3 mg of caffeine per kg of body mass (3 mg/kg/b.m; Bulk

Powders, 100% purity; United Kingdom) or the same amount of an inert substance acting as a placebo (cellulose, Guinama, Spain). The substances were ingested in identical unidentifiable capsules with 200 mL of water one hour before the onset of the experimental testing. Each trial consisted of a 15-min standardized warm-up followed by 4 sets of 8 repetitions of the bench press exercise with a load equivalent to 70% of their 1RM (as measured in the pre experimental session). The participants were encouraged to perform their lifts with maximal velocity during each bench press repetition. This protocol was designed to simulate a velocity-based workout out with a fixed volume of training. In each repetition, bar velocity during the concentric phase of the exercise was recorded and force, power and work were calculated by using bar velocity and the load in kg. The trials were performed at the same time of the day and in a laboratory setting with controlled ambient temperature (~21°C) and relative humidity (~40%).

Pre experimental trial

Once participants fulfilled all the inclusion/exclusion criteria and signed the informed consent, they were encouraged to avoid nutritional supplements and sympathetic-adrenergic stimulants for the duration of the study. One week before the first experimental trial, the participants performed a pre experimental session aimed to assess 1RM in the bench press exercise and to familiarize the subjects with the experimental protocols. Upon arrival, the participants were weighed unclothed (± 50 g, Radwag, Poland) in order to properly calculate caffeine dosage for the experimental trials and body fat percentage was evaluated afterwards with bioimpedance (model BC-418, Tanita, Japan). For the 1 RM measurement, the participants performed a 15-min warm-up and commenced with sets of increasing load estimated to be between 20 and 90% of 1RM (Romero-Moraleda, Del Coso, Gutiérrez-Hellín, Ruiz-Moreno, et al., 2019). Then, bench press 1RM was sought with a maximum of five maximal attempts permitted and three minutes of recovery between attempts. The 1RM was identified as the last successful lift with a correct technique and this value was used to standardize the load in the subsequent experimental trials. The 1RM test was

performed on the same Smith Machine used for the experimental trials.

Experimental trials

The participants were instructed to meet the following conditions 24-h before each experimental trial: (i) to avoid vigorous exercise, (ii) to adopt a similar diet and drink intake, (iii) to refrain from the consumption of alcohol, caffeine, and other stimulants. On the day of the experimental trials, the study participants arrived at the laboratory in the morning (between 10.00 and 12.00 am) in a fed state (~3 hours after their last meal). Upon arrival, the capsule with the experimental treatment (caffeine or placebo) was provided and ingested by the participant. Then, the participants rested supine for 45 min to allow for substance absorption. Thereafter, they underwent a standardized 15-min warm-up including upper body exercises and the bench press exercise executions at a progressive speed with submaximal loads. Then, they performed 4 sets of 8 repetitions of the bench press exercise on a Smith Machine (Technogym, Barcelona, Spain) with a load that represented 70% of their 1RM, as measured in the pre experimental trial. The participants were encouraged to perform each repetition at their maximal velocity during the concentric phase of the movement. The movement tempo during the exercise protocol was 1/2/X/1 (2 s for the eccentric phase, a 1 s pause during the transition phase from the eccentric to the concentric phase, with X referring to the maximum possible velocity during the concentric phase of movement, and the last digit indicated a 1 s pause between the concentric and eccentric phases; (Wilk et al., 2019). 3-min recovery periods were introduced between sets. Execution technique and motivation were standardized and monitored by 2 experienced researchers for reliability of the experimental conditions. During each attempt, the barbell displacement and duration of the concentric phase of the movement (e.g., time under tension) was recorded with a rotatory encoder and associated software (Isocontrol, EV-Pro, Spain) and mean and peak strength (N), mean and peak velocity (m/s) and mean and peak power output (W) were calculated for each repetition. The time to obtain peak values in the previously mentioned variables were also calculated. The work (J) produced in each repetition was assessed by using mean power

output and duration of the concentric phase of the movement. The total work performed in the workout (kJ) was calculated by adding the work produced in each of the 32 repetitions executed in the trial.

Statistical Analysis

The study's data were blindly introduced into the statistical package SPSS (SPSS, v. 22.0, IBM SPSS Statistics, IBM Corporation) and subsequently analysed. The Shapiro-Wilk test was used to confirm the normality of the quantitative variables and, consequently, parametric statistics were used to determine differences among trials. A two-way analysis of variance (ANOVA) (treatment \times repetition) was performed to all muscle performance variables under investigation. After a significant F test was obtained for the main effect of caffeine (Greenhouse–Geisser correction), differences in all pairwise caffeine-placebo comparisons were identified by LSD *post hoc* tests. A paired t-test was used to detect differences in the caffeine-placebo comparison of the total amount of work produced during the workout. In all statistical tests, a significance level of $p < 0.05$ was set. The data are presented as mean \pm standard deviation.

Results

Table 1 contains the effect of caffeine on muscle performance variables during the whole workout. Overall, and compared to the placebo trial, there was a main effect of the caffeine to increase mean bar velocity ($p = 0.002$) and peak bar velocity ($p = 0.006$) across the workout. Similarly, there was a main effect of caffeine to increase mean force ($p = 0.002$), mean power output ($p = 0.003$), peak power output ($p = 0.004$), and the work performed ($p = 0.004$), although the main effect of caffeine did not reach statistical significance for peak force ($p = 0.129$). On the contrary, the main effect of caffeine reduced the time to reach peak velocity ($p = 0.048$), the time to reach peak power output ($p = 0.024$) with no main effect of caffeine on the time to reach peak force ($p = 0.910$) nor on the time under tension ($p = 0.081$). In most of these variables there was a main effect of repetition indicating that the values of these variables changed across the workout. However, there was no treatment \times repetition interaction in any of the performance variables (Table 1).

Figure 1 depicts peak velocity and mean

velocity in each repetition during the workout to allow a more comprehensive view of the effect of caffeine on muscle performance. Briefly, caffeine increased peak velocity over placebo in 30 out of 32 repetitions performed during the training session while the effect was similarly present in all 4 sets (all $p < 0.05$). Likewise, caffeine increased mean velocity in 26 out of 32 repetitions performed during the training session (all $p < 0.05$). Figure 3 depicts the total work performed during the workout session as a result of the addition of the mechanical work performed in each repetition. Overall, caffeine increased the total work performed in the workout ($p < 0.05$) with 11 out of 12 athletes presenting higher values of total work with caffeine than with placebo.

Discussion

The aim of this study was to investigate the effect of acute caffeine intake on muscle performance during a velocity-based bench press workout that included 4 sets of 8 repetitions at 70% 1RM. This research question was designed to determine whether caffeine is ergogenic during resistance exercise training with a given set of volume, as all the previous investigations in this field used repetitions-to-failure testing (Rahimi, 2019; Salatto et al., 2020). The outcomes of this investigation indicate that the intake of 3 mg/kg/b.m. of caffeine one hour before exercise increased mean and peak bar velocity, mean force and, mean power and peak power across the workout. As a result, caffeine increased the total mechanical work performed in the workout which suggests that caffeine can be considered as an effective ergogenic aid to increase muscle performance during a velocity-based strength training session in the bench press exercise.

Despite the contradictory results of early investigation on the effect of caffeine on bench press exercise performance (Jacobs et al., 2003; Beck et al., 2006; Astorino et al., 2008), most recent investigations have contributed to establish caffeine's ergogenic effects on bench press performance (Diaz-Lara et al., 2016; Grgic and Mikulic, 2017; Wilk et al., 2019, 2020). However, even the most recent investigation on this topic is difficult to apply to real strength training scenarios as the assessments used in these investigations (e.g., 1 RM, load-velocity curve and strength-endurance tests) are rarely used in

workouts aimed to obtain strength training adaptations. In this regard, one of the most common used criteria for designing resistance training workouts is the 1RM continuum zone with a different number of repetitions to obtain strength gains (i.e., 2-5 repetitions), hypertrophy (6–12 repetitions) and strength-endurance (> 12 repetitions) (Sheppard and Tripplet, 2016). In addition, greater improvements in muscle power performance can be obtained in workouts

composed of sets that are performed with maximal movement velocity instead of repetitions-to-failure (Karsten et al., 2019). With this background, the current study indicates that caffeine is effective to enhance muscle performance during a velocity based bench press training session.

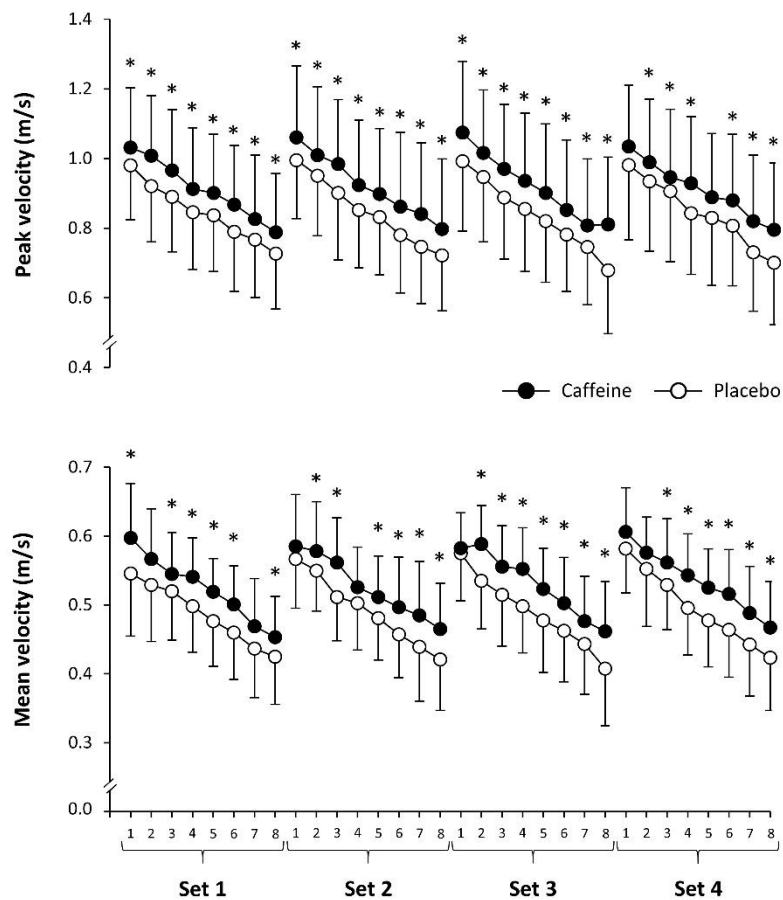


Figure 1

Peak velocity and mean velocity during a bench press exercise session consisting of 4 sets of 8 repetitions at 70% of 1 repetition-maximum after the ingestion of 3 mg/kg/b.m. of caffeine or a placebo.

Data is shown as mean \pm SD for each repetition performed in a bench press training session in 12 individuals. () Significant differences between caffeine and placebo at $p < 0.05$.*

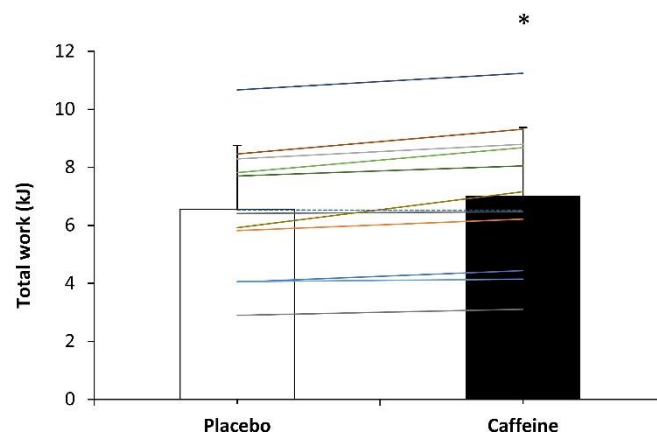


Figure 2

Total work executed during a bench press training session, consisting of 4 sets of 8 repetitions at 70% of 1RM after the ingestion of 3 mg/kg/b.m. of caffeine or a placebo. The total work performed in the workout was calculated by adding the work produced in each repetition of the bench press exercise. Each line represents one individual from a sample of 12 individuals; continuous lines depict individuals with higher total work performed with caffeine and the dashed line depicts the individual with higher total work performed with placebo. (*) Significant differences between caffeine and placebo at $p < 0.05$.

Table 1

Muscle performance variables during a bench press training session consisting of 4 sets of 8 repetitions at 70% of 1RM after the ingestion of 3 mg/kg/b.m. of caffeine or a placebo.

Variables (units)	Placebo	Caffeine	Δ (%)	Treatment	Repetition	Interaction
Mean velocity (m/s)	0.49 ± 0.07	0.53 ± 0.06	+7.8	0.002	<0.001	0.329
Peak velocity (m/s)	0.84 ± 0.17	0.92 ± 0.19	+8.7	0.006	<0.001	0.585
Mean force (N)	506 ± 203	514 ± 206	+1.5	0.002	<0.001	0.311
Peak force (N)	665 ± 282	673 ± 289	+1.2	0.129	0.462	0.507
Mean power (W)	240 ± 86	264 ± 96	+10.1	0.003	<0.001	0.464
Peak power (W)	427 ± 147	462 ± 161	+8.2	0.004	<0.001	0.583
Work (J)	205 ± 70	220 ± 75	+7.2	0.003	<0.001	0.286
Time to peak velocity (ms)	656 ± 154	632 ± 114	-3.7	0.048	0.001	0.398
Time to peak force (ms)	21.0 ± 20.3	20.5 ± 17.1	-2.7	0.910	0.509	0.495
Time to peak power (ms)	622 ± 125	592 ± 119	-4.8	0.024	0.001	0.359
Time under tension (ms)	873 ± 115	850 ± 88	-2.7	0.081	<0.001	0.176

Data is shown as mean ± SD for all the repetitions (i.e., 32) performed in the workout in 12 individuals.

As depicted in Table 1, the acute intake of caffeine produced an ergogenic effect in almost all the muscle performance variables under investigation. Interestingly, the effect of caffeine velocity- and power-based variables was superior to the effect on force-based variables. Due to the tempo movement set for this investigation (1/2/X/1), which included a 2-s pause before the all-out concentric phase of the exercise, peak values of force were achieved in the first ~20 ms of the movement. In contrast, peak values of velocity and power were obtained at 70-75% of the total time under tension indicating that the effect of caffeine was more pronounced once the barbell has been accelerated. These data may indicate that acute caffeine intake is more effective to produce velocity- and power-related enhancements induced by resistance training, although this speculation requires further exploration. In any case, the presence of the main effect of caffeine, together with the lack of treatment \times repetition interaction in the muscle performance variables investigated suggest that the effect of caffeine was similarly present across the session (Figure 1).

The experimental design employed in this investigation contains several limitations. First, the experimental training session contained 4 sets of 8 repetitions at 70% 1RM performed at maximal velocity, but it is necessary to determine if caffeine also enhanced muscle performance in other resistance-training scenarios of lower/higher number of sets and repetitions and with lower/higher number of sets. Second, the study did not include blood and tissue samples and thus we were unable to determine if the serum caffeine concentration was similar in all individuals, thus confirming the main mechanism behind caffeine's ergogenicity. Third of all, we used a group of individuals with low habituation to caffeine. As there is tolerance to caffeine ergogenic effect in endurance and anaerobic-like exercise (Lara et al., 2019), it is probable that the effect found in this investigation is smaller in individuals habituated

to caffeine. In this regard, athletes habituated to caffeine may need > 6 mg/kg/b.m. to obtain ergogenic effects of caffeine (Wilk, Krzysztofik, et al., 2019b), although this also depends on their level of habituation. Lastly, we did not obtain information about the side effects induced by the ingestion of caffeine. As several side effects are commonly reported after acute caffeine intake of similar doses (Salinero et al., 2014), the study of the prevalence of side effects is necessary before recommending caffeine to increase muscle performance during a resistance exercise workout.

In summary, the acute intake of 3 mg/kg/b.m. of caffeine before a velocity-based resistance exercise training session, increased force, velocity, power and work during a 4 \times 8-70% 1RM workout. The magnitude of the main effect of caffeine (Table 1) and the continued enhancement of resistance exercise performance through all sets and repetitions (Figure 1) indicate that caffeine was an effective aid to improve muscle performance across the workout. As recent evidence suggest, resistance training not to failure is more favourable for upper-body power gains in comparison to training programs to-failure (Karsten et al., 2019), the use of caffeine may be useful to enhance the multiple muscle and central adaptations derived from workouts with a given number of sets and repetitions performed at maximal velocity. In addition, it is probable that caffeine may be useful to offset part of the muscle performance decline within a set found when using traditional resistance exercise training (Latella et al., 2019). Future investigations should determine if the acute effect of caffeine to enhance muscle performance variables during a single workout is translated in long-term adaptations, such as hypertrophy, strength gains, and power increases if resistance exercise training is preceded by acute ingestion of caffeine.

Acknowledgements

The authors wish to thank the subjects for their invaluable contribution to the study.

The study was part of the TRAININGCAF project supported by a Grant-in-aid from the Vice-Rectorate of Research and Science, at the Camilo Jose Cela University.

References

- Aguilar-Navarro M, Muñoz G, Salinero JJ, Muñoz-Guerra J, Fernández-Álvarez M, Plata MDM, Del Coso J. Urine Caffeine Concentration in Doping Control Samples from 2004 to 2015. *Nutrients*, 2019; 11(2): 286
- Astorino TA, Rohmann RL, Firth K. Effect of caffeine ingestion on one-repetition maximum muscular strength. *Eur J Appl Physiol*, 2008; 102(2): 127–132
- Beck TW, Housh TJ, Schmidt RJ, Johnson GO, Housh DJ, Coburn JW, Malek MH. The acute effects of a caffeine-containing supplement on strength, muscular endurance, and anaerobic capabilities. *J Strength Cond Res*, 2006; 20(3): 506–510
- Del Coso J, Salinero JJ, González-Millán C, Abián-Vicén J, Pérez-González B. Dose response effects of a caffeine-containing energy drink on muscle performance: A repeated measures design. *J Int Soc Sports Nutr*, 2012; 9
- Diaz-Lara FJ, Del Coso J, García JM, Portillo LJ, Areces F, Abián-Vicén J. Caffeine improves muscular performance in elite Brazilian Jiu-jitsu athletes. *Eur J Sport Sci*, 2016; 1–8
- Fett CA, Aquino NM, Schantz Junior J, Brandão CF, De Araújo Cavalcanti JD, Fett WC. Performance of muscle strength and fatigue tolerance in young trained women supplemented with caffeine. *J Sports Med Phys Fitness*, 2018; 58(3): 249–255
- Grgic J, Grgic I, Pickering C, Schoenfeld BJ, Bishop DJ, Pedisic Z. Wake up and smell the coffee: Caffeine supplementation and exercise performance - An umbrella review of 21 published meta-analyses. *Br J Sports Med*, 2019; 54(11): 681–688
- Grgic J, Mikulic P. Caffeine ingestion acutely enhances muscular strength and power but not muscular endurance in resistance-trained men. *Eur J Sport Sci*, 2017; 17(8): 1029–1036
- Grgic J, Pickering C, Bishop DJ, Coso J Del, Schoenfeld BJ, Tinsley GM, Pedisic Z. ADORA2A C Allele Carriers Exhibit Ergogenic Responses to Caffeine Supplementation. *Nutrients*, 2020; 12(3):
- Grgic J, Sabol F, Venier S, Tallis J, Schoenfeld BJ, Coso J Del, Mikulic P. Caffeine Supplementation for Powerlifting Competitions: an Evidence-Based Approach. *J Hum Kinet*, 2019; 68(1): 37–48
- Jacobs I, Pasternak H, Bell DG. Effects of ephedrine, caffeine, and their combination on muscular endurance. *Med Sci Sports Exerc*, 2003; 35(6): 987–994
- Karsten B, Fu Y (Leon), Larumbe-Zabala E, Seijo M, Naclerio F. Impact of Two High-Volume Set Configuration Workouts on Resistance Training Outcomes in Recreationally Trained Men. *J Strength Cond Res*, 2019; 1
- Lara B, Ruiz-Moreno C, Salinero JJ, Del Coso J. Time course of tolerance to the performance benefits of caffeine. *PLoS One*, 2019; 14(1): e0210275
- Latella C, Teo WP, Drinkwater EJ, Kendall K, Haff GG. The Acute Neuromuscular Responses to Cluster Set Resistance Training: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sport Med*, 2019, December 1; Springer International Publishing
- Martínez-Cava A, Hernández-Belmonte A, Courel-Ibáñez J, Morán-Navarro R, González-Badillo JJ, Pallarés JG. Reliability of technologies to measure the barbell velocity: Implications for monitoring resistance training. *PLoS One*, 2020; 15(6): e0232465
- Mielgo-Ayuso J, Marques-Jiménez D, Refoyo I, Del Coso J, León-Guereño P, Calleja-González J. Effect of Caffeine Supplementation on Sports Performance Based on Differences Between Sexes: A Systematic Review. *Nutrients*, 2019; 11(10): 2313
- Mora-Rodríguez R, Pallarés JG, López-Gullón JM, López-Samanes Á, Fernández-Elías VE, Ortega JF. Improvements on neuromuscular performance with caffeine ingestion depend on the time-of-day. *J Sci Med Sport*, 2015; 18(3): 338–342
- Rahimi R. The effect of CYP1A2 genotype on the ergogenic properties of caffeine during resistance exercise: a randomized, double-blind, placebo-controlled, crossover study. *Ir J Med Sci*, 2019; 188(1): 337–345
- Richardson DL, Clarke ND. Effect of coffee and caffeine ingestion on resistance exercise performance. *J Strength Cond Res*, 2016; 30(10): 2892–2900
- Romero-Moraleda B, Del Coso J, Gutiérrez-Hellín J, Lara B. The Effect of Caffeine on the Velocity of Half-Squat Exercise during the Menstrual Cycle: A Randomized Controlled Trial. *Nutrients*, 2019; 11(11): 2662

- Romero-Moraleda B, Del Coso J, Gutiérrez-Hellín J, Ruiz-Moreno C, Grgic J, Lara B. The Influence of the Menstrual Cycle on Muscle Strength and Power Performance. *J Hum Kinet*, 2019; 68 123–133
- Salatto RW, Arevalo JA, Brown LE, Wiersma LD, Coburn JW. Caffeine's Effects on an Upper-Body Resistance Exercise Workout. *J Strength Cond Res*, 2020; 34(6): 1643–1648
- Salinero J., Lara B, Del Coso J. Effects of acute ingestion of caffeine on team sports performance: a systematic review and meta-analysis. *Res Sport Med*, 2019; 27(2): 238–256
- Salinero JJ, Lara B, Abian-Vicen J, Gonzalez-Millán C, Areces F, Gallo-Salazar C, ... Del Coso J. The use of energy drinks in sport: Perceived ergogenicity and side effects in male and female athletes. *Br J Nutr*, 2014; 112(9): 1494–1502
- Sheppard J, Tripplet N. Design for resistance training. In *Essential of Strength Training and Conditioning*, 2016; (pp. 439–470) Champaign, IL: Human Kinetics
- Tallis J, Yavuz HCM. The effects of low and moderate doses of caffeine supplementation on upper and lower body maximal voluntary concentric and eccentric muscle force. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2018; 43(3): 274–281
- Venier S, Grgic J, Mikulic P. Caffeinated gel ingestion enhances jump performance, muscle strength, and power in trained men. *Nutrients*, 2019; 11(4):
- Wilk M, Filip A, Krzysztofik M, Gepfert M, Zajac A, Del Coso J. Acute Caffeine Intake Enhances Mean Power Output and Bar Velocity during the Bench Press Throw in Athletes Habituated to Caffeine. *Nutrients*, 2020; 12(2): 406
- Wilk M, Filip A, Krzysztofik M, Maszczyk A, Zajac A. The acute effect of various doses of caffeine on power output and velocity during the bench press exercise among athletes habitually using caffeine. *Nutrients*, 2019; 11(7):
- Wilk M, Golas A, Krzysztofik M, Nawrocka M, Zajac A. The effects of eccentric cadence on power and velocity of the bar during the concentric phase of the bench press movement. *J Sport Sci Med*, 2019; 18(2): 191–197
- Wilk M, Krzysztofik M, Filip A, Zajac A, Del Coso J. Correction: Wilk et al. "The Effects of High Doses of Caffeine on Maximal Strength and Muscular Endurance in Athletes Habituated to Caffeine" *Nutrients*, 2019, 11(8), 1912. *Nutrients*, 2019a; 11(11):
- Wilk M, Krzysztofik M, Filip A, Zajac A, Del Coso J. The effects of high doses of caffeine on maximal strength and muscular endurance in athletes habituated to caffeine. *Nutrients*, 2019b; 11(8): 1912

Corresponding author:

Juan José Salinero.

ORCID ID. <https://orcid.org/0000-0003-4153-5100>

Camilo José Cela University.

C/Castillo de Alarcón, 49, 28642. Villanueva de la Cañada, Madrid, SPAIN

Phone: 34+918 153 131

E-mail: jjsalinero@ucjc.edu



Pre-exercise Caffeine Intake Enhances Bench Press Strength Training Adaptations

Verónica Giráldez-Costas¹, Carlos Ruiz-Moreno¹, Jaime González-García¹, Beatriz Lara¹, Juan Del Coso² and Juan José Salinero^{1,3*}

¹ Exercise Physiology Laboratory, Camilo José Cela University, Madrid, Spain, ² Centre for Sport Studies, Rey Juan Carlos University, Fuenlabrada, Spain, ³ Faculty of Sport Sciences, Castilla-La Mancha University, Toledo, Spain

OPEN ACCESS

Edited by:

Mark Russell,
Leeds Trinity University,
United Kingdom

Reviewed by:

Chris Curtis,
Middlesex University, United Kingdom
Artur Golaś,
Jerzy Kukuczka Academy of Physical
Education in Katowice, Poland

*Correspondence:

Juan José Salinero
jjsalinero@ucjc.edu
orcid.org/0000-0003-4153-5100

Specialty section:

This article was submitted to
Sport and Exercise Nutrition,
a section of the journal
Frontiers in Nutrition

Received: 28 October 2020

Accepted: 04 January 2021

Published: 26 January 2021

Citation:

Giráldez-Costas V, Ruiz-Moreno C,
González-García J, Lara B, Del Coso J
and Salinero JJ (2021) Pre-exercise
Caffeine Intake Enhances Bench
Press Strength Training Adaptations.
Front. Nutr. 8:622564.
doi: 10.3389/fnut.2021.622564

Previous research has identified acute caffeine intake as an effective ergogenic aid to enhance velocity and power during bench press exercise. However, no previous investigation has analyzed the effects of chronic intake of caffeine on training adaptations induced by bench press strength training. Thus, the aim of this investigation was to determine the effects of pre-exercise caffeine intake on training adaptations induced by a bench press training protocol. Using a double-blind, randomized experimental design, 16 healthy participants underwent a bench press training protocol for 4 weeks (12 sessions). Seven participants ingested a placebo and nine participants ingested 3 mg/kg/BM of caffeine before each training session. Three days before, and 3 days after the completion of the training protocol, participants performed a one-repetition maximum (1RM) bench press and force-velocity test (from 10 to 100% 1RM). From comparable pre-training values, the strength training similarly increased 1RM in the caffeine and placebo groups ($+13.5 \pm 7.8\%$ vs. $+11.3 \pm 5.3\%$, respectively; $p = 0.53$). In the caffeine group, the strength training induced a higher mean velocity at 40%, (0.81 ± 0.08 vs. 0.90 ± 0.14 m/s), 60% (0.60 ± 0.06 vs. 0.65 ± 0.06 m/s), 70% (0.47 ± 0.05 vs. 0.55 ± 0.06 m/s), 80% (0.37 ± 0.06 vs. 0.45 ± 0.05 m/s), 90% (0.26 ± 0.07 vs. 0.34 ± 0.06 m/s), and 100% 1RM (0.14 ± 0.04 vs. 0.25 ± 0.05 m/s; $p < 0.05$) while the increases in the placebo group were evident only at 30 (0.95 ± 0.06 vs. 1.03 ± 0.07 m/s), 70% (0.51 ± 0.03 vs. 0.57 ± 0.05 m/s) and 80% 1RM (0.37 ± 0.06 vs. 0.45 ± 0.05 m/s) ($p < 0.05$). The placebo group only increased peak velocity at 60 and 70% 1RM ($p < 0.05$) while peak velocity increased at 10%, and from 30 to 100% 1RM in the caffeine group ($p < 0.05$). The use of 3 mg/kg/BM of caffeine before exercise did not modify improvements in 1RM obtained during a 4 week bench press strength training program but induced more muscle performance adaptations over a wider range of load.

Keywords: resistance exercise, muscle strength, resistance training, stimulant, ergogenic aid

INTRODUCTION

Caffeine (1,3,7 trimethylxanthine) is one of the most commonly consumed substances in the world, despite a lack of any nutritional value (1). Within a sport setting, caffeine supplementation is a popular strategy used to improve physical performance (2, 3). Approximately, 76% of elite athletes' post-competition urine contains caffeine and this substance is present in the post-competition

urine of athletes of most sport specialties (4). The ubiquitous presence of caffeine in these urine samples suggests that athletes of very differing sport disciplines use caffeine supplementation before or during competition. Use of caffeine in sport is supported by recent evidence that confirms the ergogenic properties of acute caffeine intake (from 3 to 9 mg of caffeine per kilogram (kg) of body mass; mg/kg/BM) in a number of exercise modalities (5–10).

The main mechanism behind caffeine ergogenicity is its capacity to blunt the fatiguing effects of adenosine (11). After ingestion and distribution through several tissues, including crossing the blood brain barrier, caffeine blocks specific adenosine receptors (12) preventing the inhibition that adenosine causes on the central nervous system (CNS) (13). Therefore, acute caffeine intake produces a stimulation of the CNS that facilitates the recruitment of muscle fibers during maximal and submaximal muscle contractions (14). As adenosine is a subproduct of different metabolic pathways, the effect of caffeine on the CNS successfully enhances physical performance in a myriad of exercise activities, but it may be especially effective to enhance muscle performance. Evidence in resistance-based exercise indicates ergogenic benefits of acute caffeine intake during bench press maximal strength, muscle power output and muscular strength-endurance (15–19), with recent meta-data confirming a moderate-to-high effect of caffeine on resistance-based exercise (20). In addition, pre-exercise caffeine intake has the capacity to increase the total amount of work performed during a strength training session due to more power being produced in each repetition (16) or due to more repetitions executed with caffeine during the whole session (21).

These outcomes suggest that caffeine is useful to enhance several forms of resistance-based exercise. However, there is a lack of research on the chronic effects of caffeine intake along with a resistance training program to ascertain if the acute effects of caffeine during resistance exercise may help to augment the improvements in velocity and power output induced by strength training when caffeine is ingested before each training session. Hence, the aim of this investigation was to determine the effect of pre-exercise caffeine intake on training adaptations induced by a bench press training protocol of 4 weeks (12 training sessions). Our research group hypothesized that individuals who ingested caffeine before exercise during the strength training program would obtain greater adaptations over those who were supplemented with a placebo.

METHODS

Participants

Sixteen healthy participants (12 men and 4 women) volunteered to participate in this investigation. They presented a mean \pm standard deviation age of 27.9 ± 7.2 years; body mass of 71.7 ± 10.0 kg; body height of 173.0 ± 7.0 cm; body fat percentage of $18.3 \pm 8.1\%$; and bench press one-repetition maximum of 60.4 ± 17.8 kg. All of the participants fulfilled the following inclusion criteria: (a) age between 18 and 45 years old; (b) caffeine naïve or low habitual caffeine consumers (<0.99

mg/kg/BM/day), as previously suggested by Filip et al. (22); and (c) more than 1 year of resistance training experience. Participants were excluded if they reported (a) upper body injury within the previous 6 months; (b) a positive smoking status; (c) medication usage within the previous month; (d) a previous history of cardiopulmonary diseases; (e) allergy to caffeine; or (f) use of oral contraceptive pills, as they may interfere with caffeine pharmacokinetics (23). Participants were encouraged to maintain a diet following previous nutritional guidelines to assure carbohydrate (24) and protein availability (25), and correct hydration during the whole experiment (26) and to distribute foods in five meals throughout the day. Participants wrote their diets down in a personal journal and a subsequent analysis ensured that all participants had $>2,600$ kcal/day in the men and $>2,200$ kcal/day in the women, >5 g/kg/BM/day of carbohydrate, and >1.6 g/kg/BM/day of protein (PCN 1.0 software, Cesnid, Spain). Participants were encouraged to maintain their aerobic exercise habits (i.e., running, cycling, etc.) throughout the duration of the study to avoid any detraining effects and to refrain from vigorous exercise for at least 48 h prior to testing. They were advised to avoid any form of upper-body strength or upper-body and lower-body resistance exercise during the duration of the investigation, to avoid the interference of other resistance exercise activities on the results of the investigation. Lastly, participants were asked to abstain from any form of dietary caffeine intake and from dietary supplement use for the duration of the study. They provided their informed consent prior to participating in the investigation after having been informed of the experimental procedures and risks. The study was approved by the Camilo José Cela University Research Ethics Committee and was conducted in accordance with the latest version of the Declaration of Helsinki.

Experimental Design

This investigation followed a longitudinal, double-blind, randomized experimental design. All participants performed a 4 week strength training protocol consisting of 12 training sessions in the bench press exercise, with a frequency of 3 sessions per week. There were at least 48 h between sessions, and they were performed on Monday, Wednesday and Friday of each week. All participants performed the training sessions in the morning between 9:00 and 12:00 a.m. and at least 3 h after breakfast. They were randomly allocated to a caffeine group ($n = 9$) or to a placebo group ($n = 7$). Both groups were instructed to ingest an opaque and unidentifiable capsule 1 h before the onset of each training session. The capsule was prepared by a specialized researcher blinded to the experiment outcomes and the ingestion was confirmed by another researcher. In the caffeine group, the capsule contained caffeine (3 mg/kg/BM; 100% purity, Bulk Powders, UK) while in the placebo group the capsule contained an inert substance (cellulose; 100% purity, Guinama, Spain). Just before and after the strength training protocol, participants performed a one-repetition maximum test (1RM) in the bench press exercise and a force-velocity test using loads from 10 to 100% 1RM, as measured in the previous test. Of note, participants did not ingest any capsule before the pre-training and post-training sessions to isolate the effect of caffeine on

the strength training protocol. The trials and training sessions were performed in a laboratory setting with controlled ambient temperature ($\sim 21^{\circ}\text{C}$). **Figure 1** displays the study design.

Testing Procedures

On the day of the pre-training experimental trial, participants arrived at the laboratory in the morning (between 9.00 and 12.00 a.m.) in a fed state (~ 3 h after their last meal). Upon arrival, they were weighed unclothed (± 50 g, Radwag, Poland) in order to properly calculate caffeine dosage for the experiment. Body fat percentage was subsequently estimated by bioelectrical impedance (model BC-418, Tanita, Japan). For 1RM measurements in the bench press exercise, participants performed a 15 min standardized warm-up consisting of upper-body joint mobility exercises followed by sets of increasing loads estimated to be between 20 and 90% of the participant's 1RM (27). Then, bench press 1RM was measured with a maximum of five maximal attempts permitted and 5 min of recovery between attempts. The 1RM was identified as the maximum successful lift with a correct technique and it was used to standardize the load in the following force-velocity test and subsequent training sessions. Twenty minutes after 1RM measurement, the force-velocity test was performed with loads between 10% and 100 1RM, using 10% increments. Participants performed two maximal repetitions of the bench press exercise, with the purpose of obtaining peak bar velocity during the concentric phase of the movement with each load, and the best repetition was selected for analysis. If participants considered that the repetition was not maximal, they were allowed to repeat any attempt. Standardized verbal encouragement was used for all loads to aid participants to obtain the highest velocity (28) and they received velocity performance feedback immediately after each repetition. Execution technique was monitored by two experienced researchers for reliability of the experimental conditions. The testing was performed on a Smith Machine (Technogym, Barcelona, Spain) in which two vertical guides regulated the barbell movement. In each attempt, barbell velocity in the concentric phase of the movement was recorded with a rotatory encoder and its associated software (1,000 Hz, Isocontrol, EV-Pro, Spain) and mean and peak velocity (m/s) were measured. Mean and peak power (W) were calculated using the load in kg. The pre-training test was performed 72 h before the first training session and the post-training test was performed 72 h after the last training session.

Training Program

The training program lasted 4 weeks and included twelve training sessions in the bench press exercise. The exercise was performed in the same Smith machine employed for the testing. During the first 2 weeks, participants performed 4 sets of 10 repetitions at 60% of the pre-training 1RM and in the last 2 weeks the training protocol was changed to 4 sets of 8 repetitions at 70% of the pre-training 1RM. The training program was designed with the aim of maximizing increases in maximum/peak velocity/power in intermediate loads. Before the onset of the training protocol, participants received a plastic container with 12 unidentifiable capsules which were filled with caffeine or placebo according to the group to which they were allocated. Before each training

session, participants ingested the assigned capsule 60 min before the onset of exercise and rested supine for 1 h. Afterwards, they carried out a standardized 15 min warm-up including upper body exercises and 3 sets of 10 ballistic repetitions of the bench press throwing with a load that represented 30–40% of their 1 RM. After warming up, participants performed the training set for the session. The movement tempo during the exercise was 1/2/X/1 (one second for the eccentric phase, a 2 s pause during the transition phase from the eccentric to the concentric phase, with X referring to the highest possible velocity during the concentric phase of movement, and the last digit indicating a 1 s pause between the concentric and eccentric phases (16, 29). There was a 3 min recovery period between sets. The participants were encouraged to perform their lifts at peak velocity during each bench press repetition. Standardized verbal encouragement was used for all participants (28) and they received visual feedback between sets and at the end of the training session on power and velocity results. Execution technique was monitored by two experienced researchers, blinded to the treatment assigned to each participant, for reliability of the experimental conditions.

Statistical Analysis

Statistical analyses were carried out using the software IBM SPSS Statistics for Macintosh, Version 26.0 (IBM Corp., Armonk, NY, US). Data were normally distributed in all variables as determined by the Shapiro-Wilk test. Additionally, the sphericity assumption was checked with Mauchly's test. If this assumption presented a probability of $p < 0.05$, the Greenhouse-Geisser correction was used. At each load, a two-way (substance \times time) within-between participants analysis of variance (ANOVA) was used to identify the effects of caffeine and of the training intervention. Additionally, effect sizes (ES) were calculated between pairs using Cohen's d ($\pm 95\%$ confidence intervals) and they were interpreted according to the following thresholds: < 0.2 trivial, > 0.2 – 0.6 small, > 0.6 – 1.2 moderate, > 1.2 – 2.0 large, and > 2 very large. Results are expressed as mean \pm standard deviation. The significance level was set at $p < 0.05$.

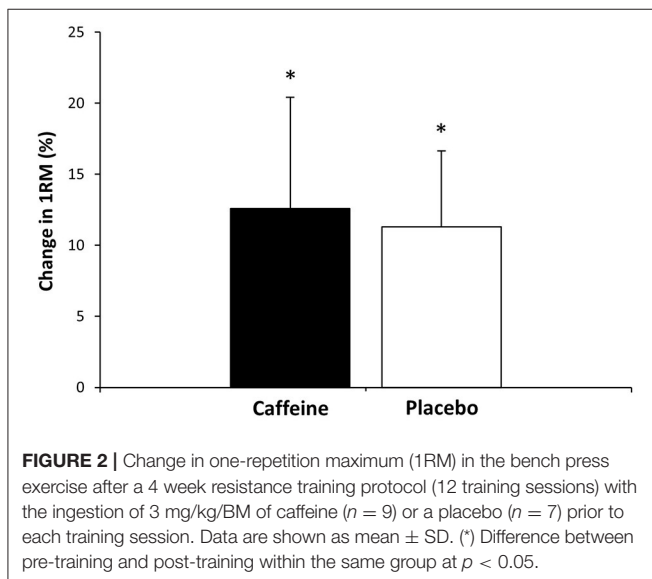
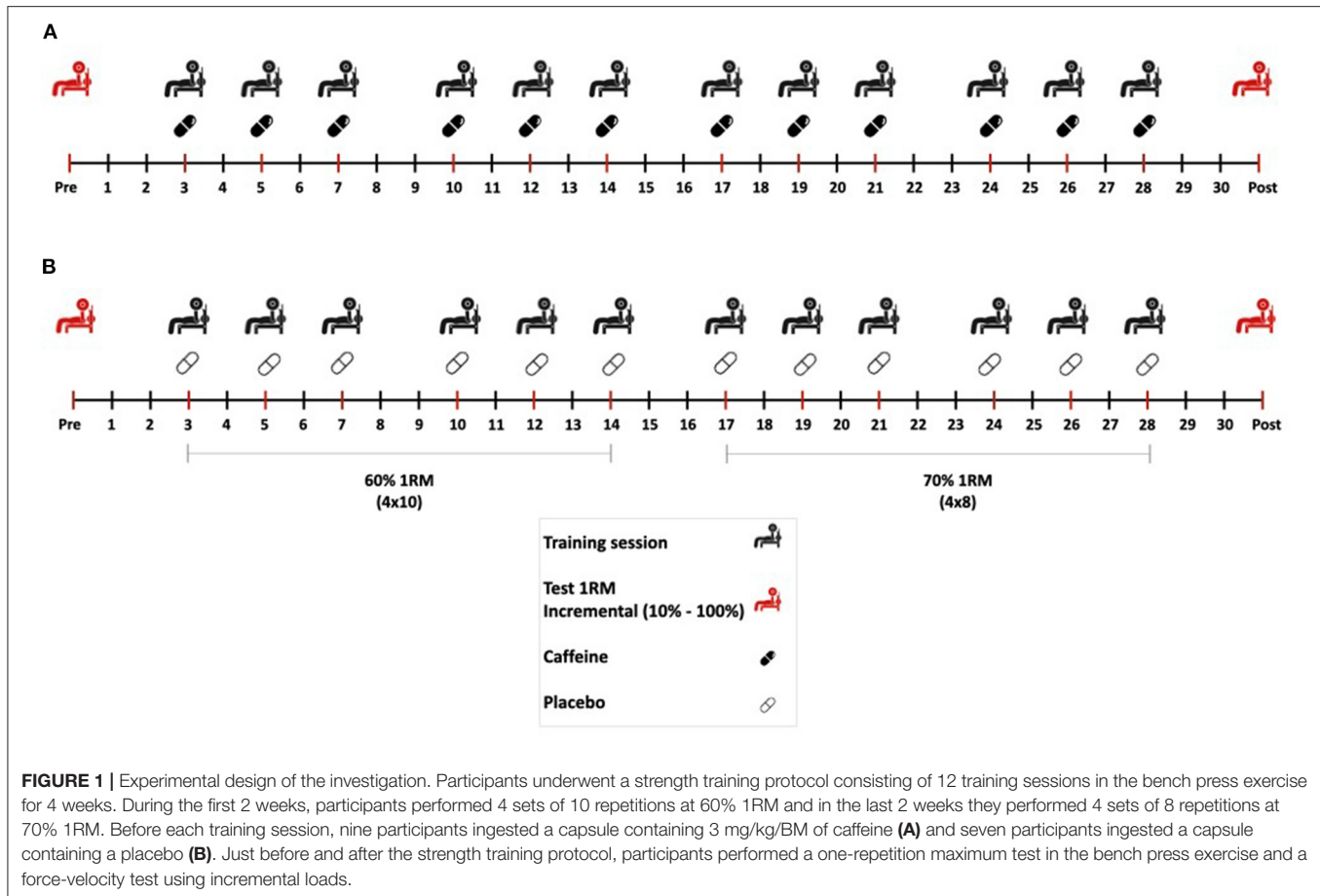
RESULTS

One Repetition Maximum

The change in 1RM induced by the training protocol was similar in both groups [$p = 0.53$; $F_{(1, 14)} = 0.42$, **Figure 2**]. Moreover, from similar pre-training values (62.50 ± 19.02 and 58 ± 15.98 kg, for caffeine and placebo, respectively; $p = 0.11$; ES = 0.06), the resistance training increased 1RM values in both the caffeine (70.13 ± 20.08 kg, $p < 0.01$; ES = 0.30) and placebo groups (64.19 ± 17.12 kg, $p < 0.01$; ES = 0.30).

Mean Velocity

There were no differences in mean velocity changes between groups at any load ($p > 0.05$). Nevertheless, in the caffeine group, there was an increase in mean velocity at 40% (0.81 ± 0.08 vs. 0.90 ± 0.14 m/s; $p = 0.01$, ES = 0.91), 60% (0.60 ± 0.06 vs. 0.65 ± 0.06 m/s; $p = 0.02$, ES = 0.74), 70% (0.47 ± 0.05 vs. 0.55 ± 0.06 m/s; $p < 0.01$, ES = 1.50), 80% (0.37 ± 0.06 vs. 0.45 ± 0.05 m/s; $p < 0.01$, ES = 1.00), 90% (0.26 ± 0.07 vs. 0.34 ± 0.06 m/s;



$p < 0.01$, ES = 0.76), and 100% 1RM (0.14 ± 0.04 vs. 0.25 ± 0.05 m/s; $p < 0.01$; ES = 2.07; **Figure 3A**). In the placebo group, mean velocity only increased at 30% (0.95 ± 0.06 vs. 1.03 ± 0.07 m/s;

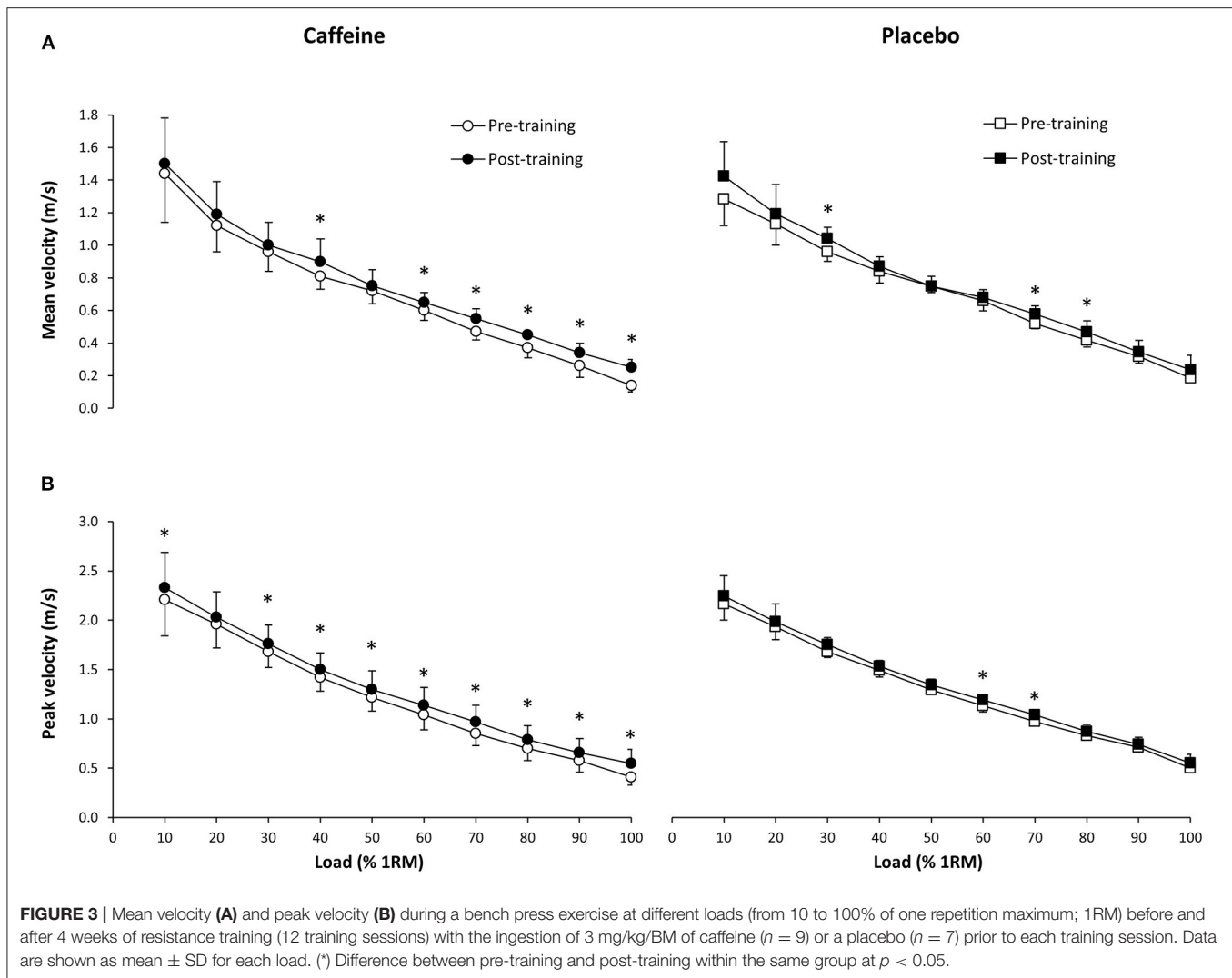
$p = 0.02$, ES = 1.07), 70% (0.51 ± 0.03 vs. 0.57 ± 0.05 m/s; $p = 0.01$, ES = 1.27), and 80% 1RM (0.37 ± 0.06 vs. 0.45 ± 0.05 m/s; $p = 0.02$, ES = 0.90).

Peak Velocity

There were no differences in peak velocity changes between groups at any load ($p > 0.05$). However, in the caffeine group, the training program increased peak velocity at 10% (2.21 ± 0.37 vs. 2.33 ± 0.36 m/s; $p = 0.01$, ES = 0.26), 30% (1.68 ± 0.16 vs. 1.76 ± 0.19 m/s; $p = 0.04$, ES = 0.43), 40% (1.42 ± 0.14 vs. 1.50 ± 0.17 m/s; $p = 0.01$, ES = 0.48), 50% (1.22 ± 0.14 vs. 1.30 ± 0.19 m/s; $p = 0.02$, ES = 0.24), 60% (1.04 ± 0.15 vs. 1.14 ± 0.18 m/s; $p < 0.01$, ES = 0.55), 70% (0.85 ± 0.12 vs. 0.97 ± 0.17 m/s; $p < 0.01$, ES = 0.74), 80% (0.70 ± 0.12 vs. 0.79 ± 0.14 m/s; $p = 0.02$, ES = 0.56), 90% (0.58 ± 0.12 vs. 0.66 ± 0.14 m/s; $p = 0.04$, ES = 0.44), and 100% 1RM (0.41 ± 0.08 vs. 0.55 ± 0.14 m/s; $p < 0.01$, ES = 1.11; **Figure 3B**). In the placebo group, peak velocity only increased at 60% (1.13 ± 0.07 vs. 1.19 ± 0.06 m/s; $p = 0.03$, ES = 0.84) and 70% 1RM (0.97 ± 0.07 vs. 1.04 ± 0.06 m/s; $p = 0.03$, ES = 0.82).

Mean Power

There were no differences in mean changes between groups at any load ($p > 0.05$). In the caffeine group, the training program increased mean power output at 20% (227.06 ± 103.09 vs. 247.68 ± 111.71 W; $p = 0.01$, ES = 0.14), 30% (268.22 ± 127.56 vs.



288.97 \pm 133.55 W; $p = 0.03$, ES = 0.12), 40% (291.24 \pm 125.56 vs. 315.85 \pm 142.53 W; $p < 0.05$, ES = 0.11), 60% (287.74 \pm 121.26 vs. 313.06 \pm 122.15 W; $p = 0.01$, ES = 0.18), 70% (246.79 \pm 93.09 vs. 299.39 \pm 117.98 W; $p < 0.01$, ES = 0.39), 80% (209.35 \pm 76.75 vs. 261.62 \pm 98.73 W; $p < 0.01$, ES = 0.48), 90% (157.61 \pm 58.56 vs. 210.40 \pm 74.01 W; $p < 0.01$, ES = 0.66), and 100% 1RM (96.77 \pm 45.62 vs. 166.90 \pm 58.84 W; $p < 0.01$, ES = 1.10; **Figure 4A**). In the placebo group, mean power output only increased at 20% (179.71 \pm 64.16 vs. 197.16 \pm 71.03 W; $p = 0.04$, ES = 0.18) and 70% 1RM (230.99 \pm 59.61 vs. 261.96 \pm 76.47 W; $p = 0.03$, ES = 0.34).

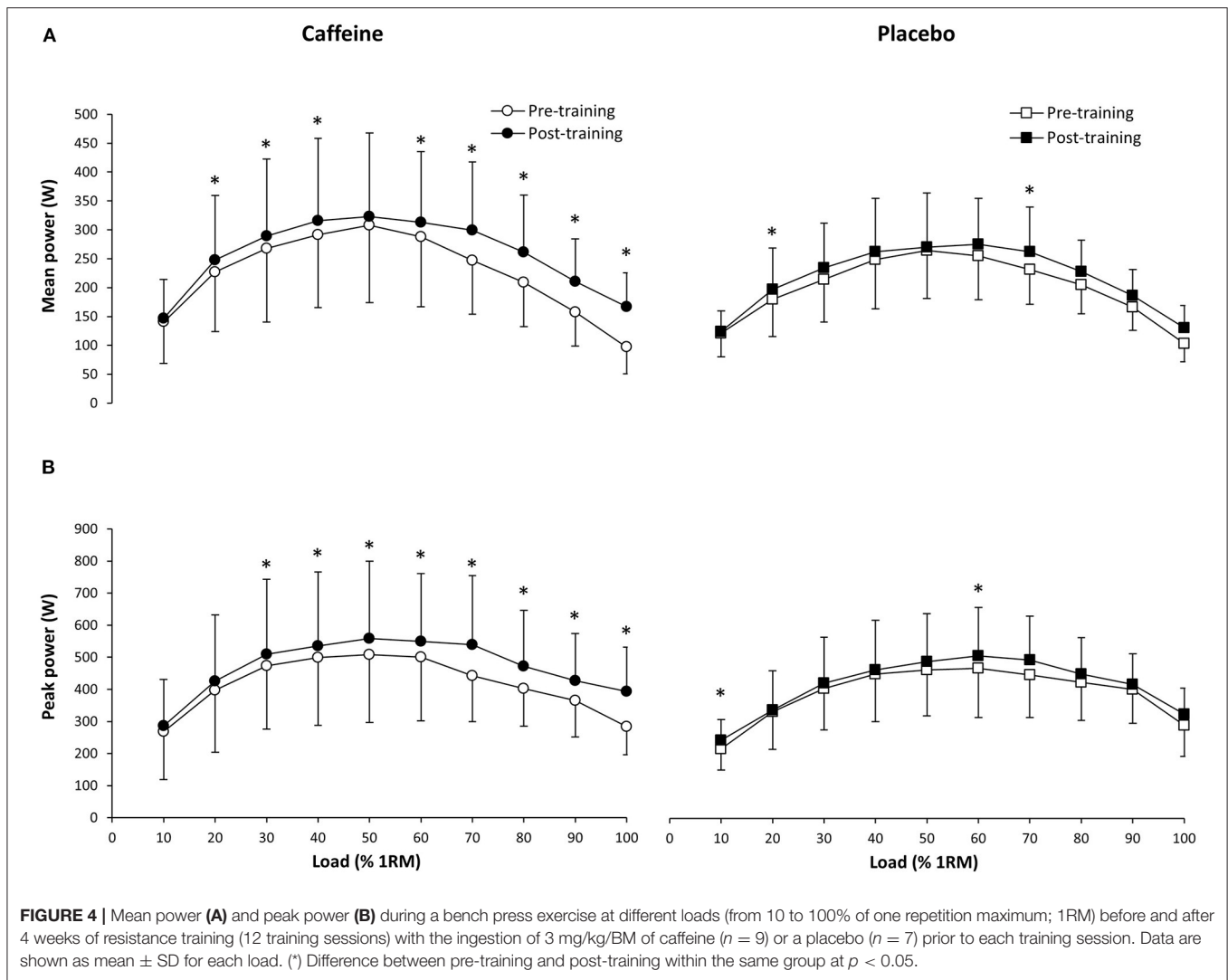
Peak Power

There were no differences in peak power changes between groups at any load ($p > 0.05$). In the caffeine group, the training program increased peak power output at 30% (473.14 \pm 197.49 vs. 509.18 \pm 233.10 W; $p = 0.02$, ES = 0.10), 40% (499.84 \pm 212.52 vs. 535.68 \pm 230.48 W; $p = 0.02$, ES = 0.10), 50% (508.01 \pm 210.92 vs. 558.51 \pm 241.32 W; $p = 0.02$, ES = 0.17), 60% (501.03 \pm

199.59 vs. 550.08 \pm 211.20 W; $p < 0.01$, ES = 0.19), 70% (442.13 \pm 142.34 vs. 538.95 \pm 215.49 W; $p < 0.01$, ES = 0.39), 80% (402.08 \pm 116.70 vs. 471.99 \pm 174.43 W; $p = 0.03$, ES = 0.34), 90% (365.14 \pm 113.43 vs. 427.31 \pm 146.91 W; $p < 0.05$, ES = 0.37), and 100% 1RM (283.43 \pm 87.18 vs. 393.35 \pm 138.39 W; $p < 0.01$, ES = 0.80; **Figure 4B**). In the placebo group, the training protocol only induced a difference in peak power output at 10% (215.51 \pm 65.88 vs. 242.22 \pm 63.91 W; $p = 0.03$, ES = 0.32) and 60% 1RM (465.57 \pm 153.15 vs. 503.33 \pm 149.75 W; $p = 0.04$, ES = 0.20).

DISCUSSION

The aim of this study was to investigate the effect of pre-exercise caffeine intake on muscle performance adaptations obtained by a bench press strength training protocol lasting 4 weeks. This research question was designed to determine whether caffeine can be effectively used to improve bench press performance as a chronic supplementation routine for training, as previous



studies in this field have reported acute benefits from the ingestion of a single dose of caffeine (16, 18, 21). To the authors' knowledge, this is the first research to analyze the concomitant effects of strength training and chronic caffeine intake on bench press performance. The main outcomes of this investigation indicate that, in comparison to a placebo, the intake of 3 mg/kg/BM of caffeine 1 h before the onset of the workout for 12 sessions increased the number of training-induced adaptations in mean and peak values for both velocity and power over the placebo (Figures 3, 4). Specifically, the magnitude of the change on the velocity-load and power-load curves was higher with caffeine than with a placebo while caffeine induced these improvements over a wider range of loads. Chronic caffeine intake did not enhance the pre-to-post-training change in the weight lifted during the 1RM test. Therefore, our results suggest that the pre-exercise use of caffeine associated with a strength training program may be useful to enhance the adaptations in muscle performance at submaximal loads in the bench press exercise.

Previous research has shown that acute caffeine intake induces several improvements in variables associated with bench press performance (16, 21, 30, 31). In the light of these outcomes, there is a consensus to consider acute caffeine intake as an effective supplementation protocol to improve performance in the bench press exercise. Based upon its acute effects, it has been suggested that caffeine may be an effective ergogenic aid when used chronically as a pre-exercise supplementation, to enhance the adaptations induced by a strength training program (3). However, no previous investigation has determined the chronic effects of caffeine intake along with a resistance training program to confirm this hypothesis. The current investigation confirms this suggestion as the intake of 3 mg of caffeine per kg of body mass before each of the 12 sessions that composed the training program was effective to increase the improvements of the program on bar velocity and power developed during the bench press exercise. The use of caffeine was effective to induce a higher number of statistically significant pre-to-post training differences for both velocity and power over a wider

range of loads, without modifying the change induced in 1RM over the placebo. This is a novel finding in the literature that points toward the efficacy of using pre-exercise caffeine supplementation to enhance training adaptations, at least for resistance-based exercise. However, the training program only lasted 4 weeks and further investigations are needed with longer training programs, with different exercises, with different doses of caffeine and with different timings for caffeine intake, to reveal if caffeine can exert ergogenic effects in other resistance exercise programs, particularly due to the potential tolerance to caffeine ergogenicity induced by chronic ingestion (32).

As load influences the movement velocity and the power output in the bench press exercise (33) it is necessary to consider the possible ergogenic effects of caffeine along the whole velocity-load and the power-load spectrum. Previous research (31) showed that caffeine increases the mean concentric velocity in the bench press at high loads (90% 1RM) more than at lower loads (50 or 75% 1RM). In our study, caffeine induced changes in mean velocity at 40% 1RM, and in all loads from 60 to 100% 1RM (Figure 3A). These changes may be associated with the training protocol used in this investigation as participants trained at 60% 1RM during the first 2 weeks and at 70% 1RM during the last 2 weeks, always using peak velocity in each repetition. Interestingly, caffeine did not affect the change in 1RM induced by the training, likely due to the lack of maximal loads used during the training program. Although it was not investigated here, it is likely that caffeine would have enhanced 1RM more than the placebo in the case of using a training program specifically designed to produce improvements in maximal strength (i.e., with some sessions including loads at 90–100% 1RM). To date, this is speculation that requires confirmation by future research. In any case, our findings suggest that training with pre-exercise caffeine supplementation may increase mean bar velocity (and therefore, mean power output) in a wider range of loads than the same training protocol without caffeine supplementation. Further investigations combining caffeine and a variety of training weights are necessary to determine the outcome of pre-exercise caffeine intake in the whole spectrum of loads.

The experimental design employed in this investigation presents some limitations that should be addressed to enhance the application of the results. First, the training program consisted of 4 sets of 8–10 bench press executions at 60–70% 1RM performed at peak velocity in a group of individuals with moderate resistance training experience and with a certain heterogeneity in 1RM values. However, it is necessary to determine if caffeine may also enhance muscle performance when using other resistance-training scenarios (i.e., with different numbers of sets, repetitions, and loads), with longer training programs, and with different doses and times of caffeine administration. As the study sample was composed of individuals with moderate resistance exercise experience, the translation of the research outcomes to highly trained athletes should be made with caution. Second, this investigation used two groups of individuals randomly allocated to the caffeine and placebo groups. Still, it is possible that part of the differences in the response to training may be associated with interindividual differences in the adaptation to strength training (34). The use

of cross-over experimental designs is needed to confirm the benefits of chronic pre-exercise caffeine intake for resistance exercise programs. Third, this study did not include blood and tissue samples and thus we have no data about serum caffeine concentrations in the individuals in the caffeine group nor the mechanism that induced a higher training response with caffeine. The assessment of serum caffeine concentration could have been useful to determine whether participants performed the training sessions with peak concentrations. In addition, the assessment of how many participants correctly guessed the group they had been allocated to would also have improved the quality of this experiment. Fourth, diet during the training program was recorded and controlled to ensure all participants consumed adequate amounts of energy, carbohydrate, and protein, but they were not standardized. The control of diet, particularly in the hours after the end of each workout, may have limited the interference of post-training feeding on the results of this investigation. Lastly, we used a group of individuals with low habituation to caffeine. As there is tolerance to the caffeine ergogenic effect in endurance and anaerobic-like exercise (32), it is probable that the effect found in this investigation would be smaller in individuals habituated to this substance. Therefore, it could be hypothesized that higher doses of caffeine may be necessary for individuals habituated to caffeine (19, 35) or when caffeine is used for periods longer than 4 weeks.

In summary, pre-exercise ingestion of 3 mg/kg/BM of caffeine did not modify improvements in 1RM obtained during a 4 week bench press strength training program. However, chronic pre-exercise caffeine ingestion increased the number of training-induced adaptations in mean and peak values for both velocity and power over the placebo. Caffeine moved the velocity-load and the power-load curves upwards to a greater extent with caffeine than with the placebo, with statistically significant differences over a wider range of loads. From a practical point of view, caffeine seems to be an effective ergogenic aid for upper-body strength training at moderate loads when ingested before exercise. Sport science practitioners and nutritionists could incorporate the use of caffeine in their interventions with athletic cohorts, but keeping in mind the drawbacks of caffeine supplementation such as the progressive importance of some side effects when the substance is consumed chronically (36). Elite athletes and recreational lifters might consider the use of caffeine for strength training, given the benefits of this substance, although the use of caffeine should be controlled by a professional to avoid excessively high doses and habituation.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The original contributions presented in the study are included in the article/supplementary material, further inquiries can be directed to the corresponding author/s.

ETHICS STATEMENT

The studies involving human participants were reviewed and approved by Institutional Review Board of the Camilo José

Cela University. The patients/participants provided their written informed consent to participate in this study.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

VG-C, CR-M, JG-G, BL, JD, and JS conceived and designed the investigation. VG-C, CR-M, JG-G, and JS collected the data. VG-C, BL, JD, and JS analyzed and interpreted the data. VG-C and JS drafted the paper. CR-M, JG-G, BL, and JD critically reviewed the paper and approved the final version submitted for publication. All authors contributed to the article and approved the submitted version.

REFERENCES

- Reyes CM, Cornelis MC. Caffeine in the diet: country-level consumption and guidelines. *Nutrients*. (2018) 10:1772. doi: 10.3390/nu10111772
- Baltazar-Martins G, Brito de Souza D, Aguilar-Navarro M, Muñoz-Guerra J, Plata MDM, Del Coso J. Prevalence and patterns of dietary supplement use in elite Spanish athletes. *J Int Soc Sports Nutr*. (2019) 16:30. doi: 10.1186/s12970-019-0296-5
- Grgic J, Sabol F, Venier S, Tallis J, Schoenfeld BJ, Coso JD, et al. Caffeine supplementation for powerlifting competitions: an evidence-based approach. *J Hum Kinet*. (2019) 68:37–48. doi: 10.2478/hukin-2019-0054
- Aguilar-Navarro M, Muñoz G, Salinero JJ, Muñoz-Guerra J, Fernández-Álvarez M, Plata M del M, et al. Urine caffeine concentration in doping control samples from 2004 to 2015. *Nutrients*. (2019) 11:286. doi: 10.3390/nu11020286
- Abian P, Del Coso J, Salinero JJ, Gallo-Salazar C, Areces F, Ruiz-Vicente D, et al. The ingestion of a caffeinated energy drink improves jump performance and activity patterns in elite badminton players. *J Sports Sci*. (2015) 33:1042–50. doi: 10.1080/02640414.2014.981849
- Gallo-Salazar C, Areces F, Abián-Vicén J, Lara B, Salinero JJ, Gonzalez-Millán C, et al. Enhancing physical performance in elite junior tennis players with a caffeinated energy drink. *Int J Sports Physiol Perform*. (2015) 10:305–10. doi: 10.1123/ijpspp.2014-0103
- Grgic J. Caffeine ingestion enhances Wingate performance: a meta-analysis. *Eur J Sport Sci*. (2018) 18:219–25. doi: 10.1080/17461391.2017.1394371
- Grgic J, Trexler ET, Lazinica B, Pedisic Z. Effects of caffeine intake on muscle strength and power: a systematic review and meta-analysis. *J Int Soc Sports Nutr*. (2018) 15:11. doi: 10.1186/s12970-018-0216-0
- Salinero JJ, Lara B, Del Coso J. Effects of acute ingestion of caffeine on team sports performance: a systematic review and meta-analysis. *Res Sports Med Print*. (2019) 27:238–56. doi: 10.1080/15438627.2018.1552146
- Southward K, Rutherford-Markwick KJ, Ali A. The effect of acute caffeine ingestion on endurance performance: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med Auckl NZ*. (2018) 48:1913–28. doi: 10.1007/s40279-018-0939-8
- Goldstein ER, Ziegenfuss T, Kalman D, Kreider R, Campbell B, Wilborn C, et al. International society of sports nutrition position stand: caffeine and performance. *J Int Soc Sports Nutr*. (2010) 7:5. doi: 10.1186/1550-2783-7-5
- Davis JM, Zhao Z, Stock HS, Mehl KA, Buggy J, Hand GA. Central nervous system effects of caffeine and adenosine on fatigue. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. (2003) 284:R399–404. doi: 10.1152/ajpregu.00386.2002
- Liu Y, Chen J, Li X, Zhou X, Hu Y, Chu S, et al. Research progress on adenosine in central nervous system diseases. *CNS Neurosci Ther*. (2019) 25:899–910. doi: 10.1111/cns.13190
- Graham TE. Caffeine and exercise: metabolism, endurance and performance. *Sports Med Auckl NZ*. (2001) 31:785–807. doi: 10.2165/00007256-200131110-00002
- Diaz-Lara FJ, Del Coso J, García JM, Portillo LJ, Areces F, Abián-Vicén J. Caffeine improves muscular performance in elite Brazilian Jiu-jitsu athletes. *Eur J Sport Sci*. (2016) 16:1079–86. doi: 10.1080/17461391.2016.1143036
- Giráldez Costas V, González García J, Lara B, Del Coso J, Wilk M, Salinero J. Caffeine increases muscle performance during a bench press

FUNDING

This study was part of the TRAININGCAF project supported by a Grant-in-aid from the Vice-Rectorate of Research and Science, at the Camilo Jose Cela University. Also, it was part of the pre-doctoral scholarships of the VG-C.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank the subjects for their invaluable contribution to the study.

- training session. *J Hum Kinet*. (2020) 74:185–93. doi: 10.2478/hukin-2020-0024
- Mora-Rodríguez R, Pallarés JG, López-Gullón JM, López-Samanes Á, Fernández-Eliás VE, Ortega JF. Improvements on neuromuscular performance with caffeine ingestion depend on the time-of-day. *J Sci Med Sport*. (2015) 18:338–42. doi: 10.1016/j.jsams.2014.04.010
- Wilk M, Filip A, Krzysztofik M, Gepfert M, Zajac A, Del Coso J. Acute caffeine intake enhances mean power output and bar velocity during the bench press throw in athletes habituated to caffeine. *Nutrients*. (2020) 12:406. doi: 10.3390/nu12020406
- Wilk M, Krzysztofik M, Filip A, Zajac A, Del Coso J. The effects of high doses of caffeine on maximal strength and muscular endurance in athletes habituated to caffeine. *Nutrients*. (2019) 11:1912. doi: 10.3390/nu11081912
- Ferreira TT, da Silva JVF, Bueno NB. Effects of caffeine supplementation on muscle endurance, maximum strength, and perceived exertion in adults submitted to strength training: a systematic review and meta-analyses. *Crit Rev Food Sci Nutr*. (2020) 1–14. doi: 10.1080/10408398.2020.1781051. [Epub ahead of print].
- Salatto RW, Arevalo JA, Brown LE, Wiersma LD, Coburn JW. Caffeine's effects on an upper-body resistance exercise workout. *J Strength Cond Res*. (2020) 34:1643–8. doi: 10.1519/JSC.0000000000002697
- Filip A, Wilk M, Krzysztofik M, Del Coso J. Inconsistency in the ergogenic effect of caffeine in athletes who regularly consume caffeine: is it due to the disparity in the criteria that defines habitual caffeine intake? *Nutrients*. (2020) 12:1087. doi: 10.3390/nu12041087
- Granfors MT, Backman JT, Laitila J, Neuvonen PJ. Oral contraceptives containing ethinyl estradiol and gestodene markedly increase plasma concentrations and effects of tizanidine by inhibiting cytochrome P450 1A2. *Clin Pharmacol Ther*. (2005) 78:400–11. doi: 10.1016/j.clpt.2005.06.009
- Burke LM, Hawley JA, Wong SHS, Jeukendrup AE. Carbohydrates for training and competition. *J Sports Sci*. (2011) 29(Suppl. 1):S17–27. doi: 10.1080/02640414.2011.585473
- Jäger R, Kerksick CM, Campbell BI, Cribb PJ, Wells SD, Skwiat TM, et al. International Society of Sports Nutrition Position Stand: protein and exercise. *J Int Soc Sports Nutr*. (2017) 14:20. doi: 10.1186/s12970-017-0177-8
- McDermott BP, Anderson SA, Armstrong LE, Casa DJ, Chevront SN, Cooper L, et al. National athletic trainers' association position statement: fluid replacement for the physically active. *J Athl Train*. (2017) 52:877–95. doi: 10.4085/1062-6050-52.9.02
- Romero-Moraleda B, Coso JD, Gutiérrez-Hellín J, Ruiz-Moreno C, Grgic J, Lara B. The influence of the menstrual cycle on muscle strength and power performance. *J Hum Kinet*. (2019) 68:123–33. doi: 10.2478/hukin-2019-0061
- Weakley J, Wilson K, Till K, Banyard H, Dyson J, Phibbs P, et al. Show me, tell me, encourage me: the effect of different forms of feedback on resistance training performance. *J Strength Cond Res*. (2020) 34:3157–63. doi: 10.1519/JSC.0000000000002887
- Wilk M, Golas A, Zmijewski P, Krzysztofik M, Filip A, Coso JD, et al. The effects of the movement tempo on the one-repetition maximum bench press results. *J Hum Kinet*. (2020) 72:151–9. doi: 10.2478/hukin-2020-0001
- Del Coso J, Salinero JJ, González-Millán C, Abián-Vicén J, Pérez-González B. Dose response effects of a caffeine-containing energy drink on muscle

- performance: a repeated measures design. *J Int Soc Sports Nutr.* (2012) 9:21. doi: 10.1186/1550-2783-9-21
31. Grgic J, Venier S, Schoenfeld B, Mikulic P. Caffeine ingestion enhances repetition velocity in resistance exercise: a randomized, crossover, double-blind study involving control and placebo conditions. *J Hum Kinet.* (2020) 74:177–83. doi: 10.2478/hukin-2020-0023
 32. Lara B, Ruiz-Moreno C, Salinero JJ, Del Coso J. Time course of tolerance to the performance benefits of caffeine. *PLoS ONE.* (2019) 14:e0210275. doi: 10.1371/journal.pone.0210275
 33. Sánchez-Medina L, González-Badillo JJ, Pérez CE, Pallarés JG. Velocity- and power-load relationships of the bench pull vs. bench press exercises. *Int J Sports Med.* (2014) 35:209–16. doi: 10.1055/s-0033-1351252
 34. Erskine RM, Jones DA, Williams AG, Stewart CE, Degens H. Inter-individual variability in the adaptation of human muscle specific tension to progressive resistance training. *Eur J Appl Physiol.* (2010) 110:1117–25. doi: 10.1007/s00421-010-1601-9
 35. Wilk M, Krzysztofik M, Filip A, Zajac A, Del Coso J. The effects of high doses of caffeine on maximal strength and muscular endurance in athletes habituated to caffeine. *Nutrients.* (2019) 11:1912. doi: 10.3390/nu1112660
 36. Ruiz-Moreno C, Lara B, Salinero JJ, Brito de Souza D, Ordovás JM, Del Coso J. Time course of tolerance to adverse effects associated with the ingestion of a moderate dose of caffeine. *Eur J Nutr.* (2020) 59:3293–302. doi: 10.1007/s00394-019-02167-2

Conflict of Interest: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright © 2021 Giráldez-Costas, Ruiz-Moreno, González-García, Lara, Del Coso and Salinero. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.



Acute caffeine supplementation enhances several aspects of shot put performance in trained athletes

Verónica Giráldez-Costas, Millán Aguilar-Navarro, Jaime González-García, Juan Del Coso & Juan José Salinero

To cite this article: Verónica Giráldez-Costas, Millán Aguilar-Navarro, Jaime González-García, Juan Del Coso & Juan José Salinero (2022) Acute caffeine supplementation enhances several aspects of shot put performance in trained athletes, Journal of the International Society of Sports Nutrition, 19:1, 366-380, DOI: [10.1080/15502783.2022.2096415](https://doi.org/10.1080/15502783.2022.2096415)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/15502783.2022.2096415>



© 2022 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 06 Jul 2022.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 561



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

RESEARCH ARTICLE



Acute caffeine supplementation enhances several aspects of shot put performance in trained athletes

Verónica Giráldez-Costas ^a, Millán Aguilar-Navarro ^b, Jaime González-García ^a, Juan Del Coso ^{a,c} and Juan José Salinero ^d

^aCamilo José Cela University, Exercise Physiology Laboratory, Madrid, Spain; ^bUniversidad Francisco de Vitoria, Faculty of Health Science, Madrid, Spain; ^cRey Juan Carlos University, Centre for Sport Studies, Fuenlabrada, Spain; ^dCastilla-La Mancha University, Faculty of Sport Sciences. Sport Training Laboratory (GIRD), Toledo, Spain

ABSTRACT

The aim of this investigation was to determine the effect of a moderate dose of caffeine (3 mg/kg/b.m.) on muscular power and strength and shot put performance in trained athletes. Methods. Thirteen shot putters (eight men and five women) participated in a double-blind, placebo-controlled, randomized experiment. In two different trials, participants ingested either 3 mg/kg/b.m. of caffeine or a placebo. Forty-five min after substance ingestion, athletes performed a handgrip dynamometry test, a countermovement jump (CMJ), a squat jump (SJ), and a maximum-velocity push-up. The athletes also performed three types of throws: a backwards throw, a standing shot put and a complete shot put. Results. In comparison with the placebo, caffeine ingestion increased CMJ height (32.25 ± 7.26 vs. 33.83 ± 7.72 cm, respectively; effect size (ES) = 0.82, $p = 0.012$; +5.0%) and SJ height (29.93 ± 7.88 vs. 31.40 ± 7.16 cm; ES = 0.63, $p = 0.042$; +6.4%) and distance in the standing shot put (10.27 ± 1.77 m vs. 10.55 ± 1.94 m; ES = 0.87, $p = 0.009$; +2.6%). However, caffeine ingestion did not increase strength in the handgrip test, power in the ballistic push-up, or distance in the backwards throw (all $p > 0.05$). Shot put performance changed from 11.24 ± 2.54 to 11.35 ± 2.57 m (ES = 0.33, $p = 0.26$; +1.0%), although the difference did not reach statistically significant differences. Caffeine ingestion did not increase the prevalence of side effects (nervousness, gastrointestinal problems, activeness, irritability, muscular pain, headache, and diuresis) in comparison with the placebo ($p > 0.05$). Conclusion. In summary, caffeine ingestion with a dose equivalent to 3 mg/kg/b.m. elicited moderate improvements in several aspects of physical performance in trained shot putters but with a small effect on distance in a complete shot put.

ARTICLE HISTORY

Received 19 October 2021

Revised 13 June 2022

Accepted 21 June 2022

KEYWORDS

Ergogenic aids; athletics; elite athlete; throwing; vertical jump

1. Introduction

Caffeine is widely consumed in the sports context. According to the caffeine concentration in urine samples obtained after competition for anti-doping purposes, three out of four elite athletes had consumed caffeine before or during competition [1]. Athletics was among the sports with the highest urine caffeine concentration and the concentration of

CONTACT Verónica Giráldez-Costas  vgiraldez@ucjc.edu  Camilo José Cela University, Institution: Education and Health Faculty. C/Castillo de Alarcón, 49, Villanueva de la Cañada, Madrid 28692, Spain

© 2022 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

caffeine in the sample of athletes has doubled since the elimination of caffeine from the list of banned substances [1]. The main cause of this high use of caffeine in Athletics is likely due to the strong evidence of the ergogenic effect of caffeine on a wide spectrum of exercise situations. Supplementation with caffeine prior to exercise (at a dosage of 3–6 mg per kg of body mass; mg/kg/b.m.), acutely improves various aspects of physical performance [2–7], including aerobic [3,5] and anaerobic [8,9] activities, and strength and power [3,10,11]. Strangely enough, few studies have analyzed the translation of these caffeine-induced ergogenic effects on physical variables to specific benefits in complex athletics disciplines, such as throwing events.

Athletics is a complex sport because it includes a variety of disciplines with very different physical and physiological requirements to achieve high performance. Overall, the disciplines of Athletics can be grouped into races, jumping and throwing events. While the International Association of Athletics Federations Consensus Statement recommends caffeine as an ergogenic aid for different event groups in Athletics [12], the truth is that running disciplines with a more aerobic-like nature, such as middle- and long-distance races, have received more attention in caffeine research [13–16] than jumping and throwing events. One recent investigation concluded that acute caffeine ingestion improves high-jump but not long-jump performance [17]. Similarly, to the authors' knowledge, there is only one study on the effects of caffeine intake in throwing events [18]. Bellar et al. [18] assessed the efficacy of a low-dose of caffeine (*i.e.* 100 mg) for an early morning performance in trained college shot-putters. These authors found that caffeine produced better shot put performance over the course of six attempts. However, shot put performance during official competitions is not assessed by mean distance over six attempts but through the best distance obtained within the six attempts. Unfortunately, Bellar et al.'s investigation [18] did not present the effect of caffeine on the best throw of the six attempts and it is impossible to ascertain with their data the real impact of caffeine on shot put performance. Additionally, in Bellar's investigation [18], the dose of caffeine employed was not individualized by body mass and it was, on average, 0.9 mg/kg/b.m., which is well below the general recommendations for caffeine supplementation in sport. In fact, the International Olympic Committee [19] and the International Society of Sports Nutrition [3] recommend the use of at least 3 to 6 mg/kg/b.m. of caffeine to enhance physical performance and, therefore, it is unknown if caffeine can enhance shot put performance when used in the dose recommended. Several systematic reviews argued that these moderate doses of caffeine improve one-repetition maximum, isometric, and isokinetic strength, rate of force development as well as muscular endurance, velocity, and power in different resistance exercises [3,11,20]. Shot put is a highly intricate discipline because demands the performance of lower and upper body movements in sequence at peak velocity while they had been to be performed within a circle 2.135 m in diameter. Hence, strength, speed, and power are keys to better performance [21,22] but the movements have to be performed with an established technique to obtain maximal distance [23]. Previous research has shown that performance in strength tests such as bench press or half squat, and explosive tests such as Olympic-style lifts, explosive-throwing bench-press or countermovement jumps (CMJ) are related to shot put performance [22,24–27]

Hence, the aim of this investigation was to determine the effect of an individualized and moderate dose of caffeine (3 mg/kg/b.m.) on muscular power, shot put-specific performance tests and, on a complete shot put throw in trained shot putters. We hypothesized that this moderate dose of caffeine would improve neuromuscular performance in shot put-specific tests and the best distance obtained during a complete shot put.

2. Method

2.1. Participants

Thirteen trained shot putters (eight men and five women) volunteered to participate in this investigation. An *a priori* sample size estimation revealed that at least 11 participants were needed to investigate the potential ergogenic effect of caffeine with an effect size of 0.996 tested with a two-tailed paired sample t-test ($1 - \beta = 0.8$; $\alpha = 0.05$). This calculation was based on the effect size obtained with caffeine on standing shot put of Bellar et al.'s investigation [18] and it was performed with the G*Power (v3.1.9.6) software. Participants had a mean \pm standard deviation age of 24.5 ± 10.0 years; body mass of 92.8 ± 20.6 kg; body height of 180.2 ± 8.7 cm; training experience in the discipline of 8.7 ± 6.9 years; training frequency of 8.0 ± 3.3 sessions/week; and daily caffeine consumption of 1.5 ± 0.9 mg/kg/d. All of the participants fulfilled the following inclusion criteria: a) age between 18 and 45 years old; and b) more than 1 year of shot put training experience. Participants were excluded if they reported a) sport injury within the previous two months; b) medication usage within the previous month; c) allergy to caffeine; or d) use of oral contraceptive pills, as they may interfere with caffeine pharmacokinetics [28]. Participants were asked to abstain from any form of dietary caffeine and from dietary supplement use for the duration of the study. All the participants were familiarized with the testing procedures employed in the current experiment as part of their training routines. Additionally, participants reproduced the strength and power tests in the same order and with the recovery times set for the experiment in a training session one week before the onset of the experiment. Participants were provided with informed consent forms prior to participating in the investigation in which they were informed of the experimental procedures and risks. The study was approved by the Camilo José Cela University Research Ethics Committee and was performed in accordance with the latest version of the Declaration of Helsinki.

2.2. Experimental design

A double-blind, placebo-controlled, randomized, and counterbalanced experimental design was used in this investigation. Each participant took part in two identical experimental trials separated by seven days to allow complete recovery, testing reproducibility, and substance wash-out. Participants acted as their own controls to produce a crossover design with repeated measures in which only the substance ingested before testing differed between the trials. In the experimental trials, the participants ingested: (a) 3 mg/kg/b.m. of caffeine (BulkPowders, 100% purity; United Kingdom); or (b) the same amount of an inert substance acting as a placebo (cellulose, Guinama, Spain). This dose

was selected according to current evidence about the dose of caffeine to produce an ergogenic effect on sports performance [3,11,19]. The substances were ingested in identical unidentifiable capsules with 200 mL of water 45 minutes before the onset of the experimental testing. The trials were performed at the same time of the day and in an outdoor shot put training facility with similar ambient temperature (~14°C) and relative humidity (~40%).

2.3. Procedure

The participants were instructed to comply with the following conditions 24-h before each experimental trial: (i) to avoid vigorous exercise, (ii) to adopt a similar diet and drink intake, (iii) to refrain from the consumption of alcohol, caffeine, and other stimulants. On the day of the experimental trials, the study participants arrived at the facility in the morning (between 9.00 and 13.00 am) in a fed state (~3 hours after their last meal). Upon arrival, the capsule with the experimental treatment (caffeine or placebo) was provided and ingested by the participant. Then, participants rested for 25 min while they filled out a validated Food Frequency Questionnaire (FFQ) [29] to assess daily caffeine intake. Portions were used to assess the amount of food consumed and exact brands of products consumed were identified to accurately calculate caffeine consumption. Habitual caffeine intake was estimated based on the responses provided to the FFQ. Thereafter, they underwent a standardized 20-min warm-up identical to their competition routines which consisted of running, upper and lower body exercises, and several forms of throws with medicine balls. Then, the athletes started with the physical tests as follows:

2.4. Handgrip test

Each participant performed two maximal isometric voluntary contractions with the dominant and non-dominant hand. The highest force value out of two attempts was used for analysis, with attempts separated by 1 min of rest. Each participant performed this test with the shoulder and elbow in anatomical position, the forearm and hand in a neutral position, and handgrip force was measured with a digital dynamometer (Takei 5101, Tokyo, Japan).

2.5. Countermovement (CMJ) and Squat Jumps (SJ)

After 2 min of recovery, the participant performed two maximal CMJ and two maximal SJ, with the attempts separated by one minute of rest and three minutes between jump types. Participants were instructed to jump as high as possible and the highest jump for each jump type was used for analysis. Arms were placed on the hips during the jump tests to avoid the influence of the arm swing on jump height and a researcher verified that take-off and landing were performed in a correct position. Both CMJ and SJ were performed on a Force-Decks FD4000 Dual Force Platform (ForceDecks, London, United Kingdom), with a sample rate of 1,000 Hz. The highest jump was used for analysis. In each jump, peak power, and peak velocity during the concentric phase of the movement were recorded as muscular power and velocity at take off have been associated with shot put distance during the competition period [26].

2.6. The maximum-velocity push-up test

After 2 min of recovery, participants lay down and placed their hands on the Force-Decks FD4000 Dual Force Platform, approximately shoulder-width apart, and lowered the chest until it contacted the plates. Upon command, participants performed a maximum-velocity push-up. For this test, participants extended their arms as fast as possible to lose hand contact with the plates while the tips of the toes were always in contact with the floor. Each participant performed two maximum-velocity push-ups separated by 1 min of rest between attempts. The highest push-up was used for analysis. Peak power and peak velocity during the concentric phase of the push-up were also recorded.

2.7. Backwards throw, standing, and complete shot put

After the above-mentioned tests, participants went to a training shot put zone and performed an additional 5-min warm-up including different types of throws with the official shot. All throwing tests were performed on an official concrete ground outdoor circle. Participants performed the throws using an official shot for women (4 kg) and for men (7.260 kg). Each participant performed three attempts for each throw type, with the attempts separated by 3 minutes of rest and 5 minutes between throw types. The throw with the longest distance was used for the statistical analysis. Participants were encouraged to produce maximal distance throws in each attempt, and they were in a competition-like environment. The motivation was standardized and coaching was not allowed to avoid the influence of these factors on the outcomes of the experiment. First, a backwards throw was performed. For this throw, participants stood on the edge of the official concrete circle facing in the opposite direction to the direction of the throw. They then grasped the official shot with both hands, flexed their knees, and lowered the ball to place it between their knees. Starting in this position, participants extended their legs, followed by extension of their backs, and finally extension of their shoulders to throw the shot backwards over their heads, attempting to achieve maximum distance. Second, a standing shot put (i.e. without flight phase) was performed. For the standing shot put, participants put their feet about shoulder-width apart and performed only the delivery phase of the shot put, attempting to achieve maximum distance. Finally, a complete shot put was performed according to World Athletics rules (if the athlete committed a foul, they performed an additional shot put). Participants performed the complete shot put either with a glide ($n = 5$) or rotational style ($n = 8$) according to their preferences. However, the style was kept constant for all attempts and for all experimental trials. Intraclass correlation coefficient (ICC), standard error of measurement (SEM) and minimal detectable change (MDC) were calculated for the backwards throw, for the standing shot put and for the complete shot put from the two best throws in each test in the placebo condition with the following results: Backwards throw: ICC = 0.966; SEM = 0.058; MDC = 0.16 m; Standing shot put: ICC = 0.973; SEM 0.034; MDC = 0.10 m; Complete shot put: ICC = 0.984; SEM = 0.033; MDC = 0.09 m. The SEM was calculated as follows: $SEM = s \pm \sqrt{1 - ICC}$. The MDC was calculated as follows: $MDC = SEM * 1.96 * \sqrt{2}$ [10].

At the end of each experimental trial, the athletes were required to fill out a questionnaire about their perception of muscle power. The questionnaire of perception of muscle power included a 1–10-point scale, and participants were previously informed that 1 point meant a minimal amount and 10 points meant a maximal amount. This

questionnaire also included a question in which participants had to guess if they had received caffeine or placebo, to evaluate the success of the participants blinding procedure. Moreover, participants were provided with a side-effects survey to be filled out before going to sleep to determine if they had perceived any caffeine-associated side effects the hours after the capsule ingestion. This survey asked about participants' nervousness, gastrointestinal problems, muscle pain, irritability, diuresis, headache, and activeness using a yes/no scale. These questionnaires have been previously used to assess perceived ergogenicity and the prevalence of side effects after the intake of caffeine in the sports context [30]. Participants who did not complete these questionnaires on time were eliminated from the analysis. Thus, three participants were excluded from the statistical analysis based on this criterion.

2.8. Statistical analysis

The study data were introduced into the statistical package JAMOVI (v. 2.2.5) and subsequently analyzed. The Shapiro–Wilk test was used to confirm the normality of each variable. All the variables presented a normal distribution and, consequently, parametric statistics were used to determine differences among trials. A paired t-test was performed to compare performance values with placebo vs. caffeine for all physical testing. Additionally, effect sizes (ES) were calculated by using the Cohen's *d* and they were interpreted according to the following thresholds: <0.20 trivial, ≥0.20-0.59 small, ≥0.60-1.19 moderate, ≥1.20-1.99 large, and ≥2.00 very large [31]. Results are expressed as mean ± standard deviation. Data on side effects are presented as percentages to represent the proportion of athletes that reported each side effect. Differences in the prevalence of each side effect after caffeine or placebo intake were analyzed using the McNemar test. The blinding assessment was performed with Kappa index and Bang's Index [32]. In all statistical tests, the significance level was set at $p < 0.050$.

3. Results

There were not differences between caffeine and placebo for handgrip force in either the dominant hand (48.22 ± 12.18 vs 48.38 ± 13.01 kg, ES = -0.06, $p = 0.843$) or the non-dominant hand (43.35 ± 11.35 vs 42.86 ± 12.25 kg, ES = 0.13, $p = 0.642$). The effects of caffeine on CMJ, SJ and push-up performance variables are displayed in Table 1. Caffeine significantly increased CMJ jump height (+5.0%, ES = 0.82, $p = 0.012$), peak power (+2.5%, ES = 0.70, $p = 0.027$) and peak velocity (+1.8%, ES = 0.67, $p = 0.033$) during the concentric phase of the jump. In the SJ, caffeine increased jump height (+6.4%, ES = 0.63, $p = 0.042$), and concentric peak velocity (+2.8%, ES = 0.65, $p = 0.037$). Nevertheless, there were no statistically significant differences in ballistic push-up between caffeine and placebo ($p > 0.050$) although the values for caffeine were always higher for height (+16.2%, ES = 0.56, $p = 0.110$), peak power (+12.7%, ES = 0.70, $p = 0.055$) and peak velocity (+10.6%, ES = 0.62, $p = 0.082$).

Figure 1 depicts individual distances obtained in the different throwing tests to facilitate a more comprehensive view of the effect of caffeine. Caffeine increased the distance obtained in the standing shot put over the placebo (10.55 ± 1.94 vs. 10.27 ± 1.77 m; +2.6%, ES = 0.87, $p = 0.009$). Out of 13 shot putters, 11 improved the

Table 1. Variables of CMJ, SJ and ballistic push up after the ingestion of 3 mg/kg/b.m. of caffeine or a placebo.

	CMJ			SJ			Push Up		
	Placebo	Caffeine	ES	Placebo	Caffeine	ES	Placebo	Caffeine	ES
Jump height (imp-mom) [cm]	32.3 ± 7.6	33.8 ± 8.0*	0.82	29.9 ± 8.2	31.4 ± 7.5*	0.63	9.3 ± 4.5	12.7 ± 8.3	0.56
Peak velocity [m/s]	2.6 ± 0.3	2.7 ± 0.3*	0.67	2.5 ± 0.3	2.6 ± 0.3*	0.65	1.9 ± 0.3	2.1 ± 0.5	0.62
Peak power (W)	4496.2 ± 1384.5	4617.2 ± 1471.9*	0.70	4548.9 ± 1450.4	4631.7 ± 1377.9	0.33	1496.2 ± 453.4	1753 ± 683.3	0.70

Data is shown as mean SD. (*) Significant differences between caffeine and placebo at $p < 0.05$.

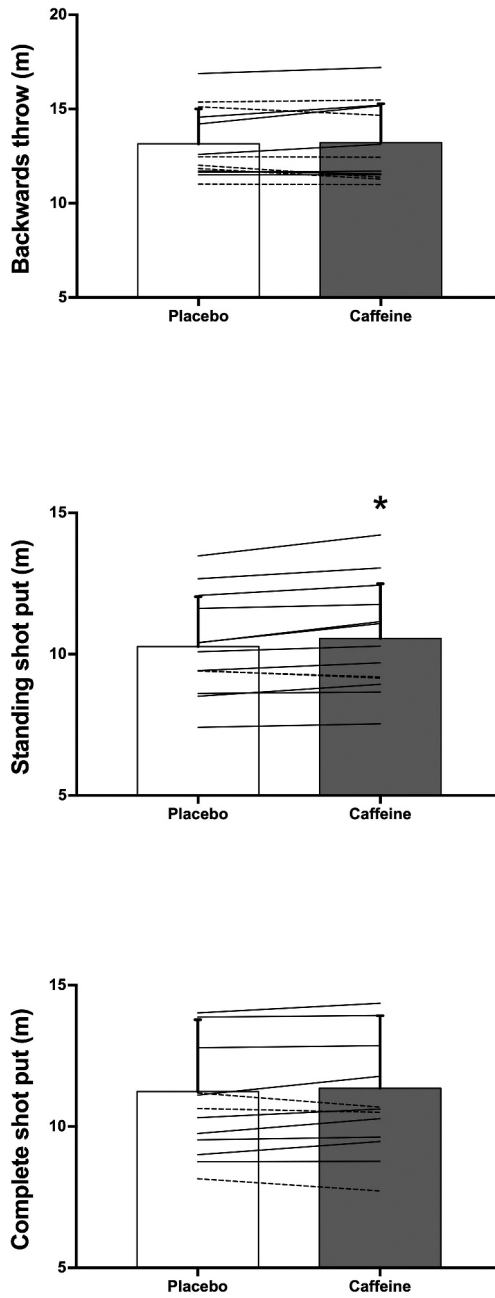


Figure 1. Individual responses for distance (m) during of the shot-put with different methods after the ingestion of 3 mg/kg/b.m. of caffeine or a placebo. Each line represents one individual from a sample of 13 individuals; continuous lines depict individuals who increased the caffeine distance with respect to placebo and the dashed line depicts the individual with decreased the caffeine distance with respect to placebo. (*) Significant differences between caffeine and placebo at $p < 0.050$.

Table 2. Prevalence of side-effects the hours after with the ingestion of caffeine or placebo. Data are % affirmative responses obtained from 10 trained athletes.

	Placebo (%)	Caffeine (%)	<i>p</i>
Nervousness	0.0	10.0	0.317
Gastrointestinal problems	10	20	0.317
Activeness	10	30	0.157
Irritable	10	0	0.317
Muscular pain	10	20	0.317
Headache	40	10	0.083
Increased urine production	10	10	1.000

Data is shown as % of affirmative responses. (*) Significant differences between caffeine and placebo at $p < 0.05$.

distance obtained in the standing shot put with caffeine intake. However, there were no significant differences in the backwards throw (13.21 ± 2.07 vs. 13.15 ± 1.85 m; $+0.3\%$, $ES = 0.13$, $p = 0.638$) or in the complete shot put (11.35 ± 2.57 vs. 11.24 ± 2.54 m; $+1.0\%$, $ES = 0.33$, $p = 0.263$). Nevertheless, seven shot putters improved the distance obtained in the backwards throw with caffeine intake and nine shot putters improved the distance obtained in the complete shot put with respect to the distances obtained in the placebo trial.

Fouls were similar between conditions, with 10 shot put throws judged as fouls with caffeine and 7 with the placebo. Table 2 depicts the prevalence of side effects the hours after the ingestion of caffeine or the placebo. There was no difference between conditions for any side effects analyzed. Six out of 13 athletes failed to guess the correct order of the placebo-caffeine conditions (significant differences between perception and real ingestion, Cohen's Kappa = 0.39; $p = 0.047$; Bang Index = 0.23 and 0.54 for caffeine and placebo condition, respectively), so the blind design was successful. Also, 10 athletes indicated greater self-perception of muscle power in the caffeine condition compared to the placebo condition (31.15%, $p = 0.051$).

4. Discussion

The aim of this investigation was to determine the effect of a moderate dose of caffeine (3 mg/kg/b.m.) on muscular power and strength tests and on shot put performance in trained athletes. The main outcomes of this investigation indicate that, in comparison to a placebo, the intake of caffeine increased jump performance in CMJ and SJ (Table 1) and increased the distance obtained in a standing shot put (Figure 1). However, the enhancements with caffeine did not reach statistical significance for handgrip dynamometry, push-up performance, and for the distances obtained in the backwards throw and complete shot put. Thus, caffeine ingestion, at a dose of 3 mg/kg/b.m. improved several aspects of physical performance in trained shot putters but the potential ergogenic effect of caffeine was of small magnitude on distance in a complete shot put.

There is a gap in the literature on the effects of caffeine on shot put performance or in any other throwing event in Athletics. Only Bellar et al. [18] have investigated the ergogenicity of a low dose of 100 mg of caffeine, but the dose selected in the study was lower than the suggested minimal doses of 1.5 mg/kg/b.m [11]. and there was no normalization of caffeine dose per participant's body mass. In our study, we used 3 mg/kg of caffeine according to actual evidence that suggests that moderate doses of caffeine,

habitually from 3 to 6 mg/kg/b.m., are needed to effectively increase maximal muscle strength, power output, and strength-endurance [3,10,20]. In addition, shot putters in Bellar et al.'s investigation [18] only performed a standing shot put (habitually used as a training routine), limiting the extrapolation of their findings to shot put performance during a real competition because this type of throw lacks a flight phase. In our research, the effect of caffeine was assessed by taking into account the best attempt with the longest distance (and not mean distance over several attempts), mimicking the conditions of a shot put competition. Additionally, the current study includes both the standing and complete shot put to assess the potential effect of caffeine on throws habitually used during training and competition. For these reasons, the current experiment is innovative and more ecologically valid in terms of applicability to trained shot putters than previous investigations.

Interestingly, caffeine supplementation was effective to enhance standing shot put performance but the effect of caffeine on the complete shot put did not reach statistical significance. Previous literature suggests that changes from 0.9 to 1.5% in the distance obtained during shot put are worthwhile improvements in elite throwers [33]. In our experiment, the effect of caffeine on the standing shot put surpassed this threshold (+2.6%), while caffeine improved distance in the complete shot put by 1.0%. Additionally, performance improvements with caffeine were greater than minimum detectable change in the standing shot put (mean improvement = 0.18 m vs MDC = 0.10 m) and in the complete shot put (mean improvement = 0.11 m vs MDC = 0.09 m). It is important to note that in the recent 2020 Olympic Games hosted in Tokyo, the difference between the gold and silver medals was 2.8/3.8% for men/women and the difference between the silver and bronze medals was of 0.8/0.9%. Collectively, all this information suggests that oral caffeine intake produced a non-statistically significant improvement of 1% in the distance obtained in a complete shot put. Although this effect was of small magnitude, it may represent a meaningful advantage for shot put performance beyond its statistical significance.

One of the hypotheses explaining the lack of a statistically significant effect of caffeine on the complete shot put is the difficulty to transfer the enhanced physicality induced with caffeine to overall shot put performance due to the technical complexity of this throw. Previous studies with moderate doses of caffeine (between 3 and 6 mg/kg/b.m.) have found ergogenic effects in simpler throw tasks, such as seated medicine ball throwing [34], bench press throw [35], or handball throws [36]. Nevertheless, the shot put is a complex throwing event that includes a preparation phase, a flight phase (glide or turn), a delivery phase, and a final recovery phase. Performance in the flight and delivery phases mainly depends on the strength and power output, and the proper application of these to the shot is obtained through multifaceted technical movements [21,37]. The application of power over a full range of multiple joint movements requires properly timed coordination of acceleration of all body segments in a sequence of action in order to produce a maximum velocity of the throwing hand [21,37,38]. The increase of the speed of the previous phases of the throw could negatively affect movement coordination and performance during the delivery phase, so kinematics and kinetics within each phase of shot put are codependent [37]. This could explain the improvement in the standing shot put (in line with previous

research using simpler strength and power tasks [18,34–36]) in absence of ergogenic effects on the more complex complete shot put. Future research must elucidate if repeated shot put training sessions with caffeine ingestion could improve competition performance by adjusting the motor pattern to these improved exercise capacities.

The results of the present study showed a clear ergogenic effect of caffeine on CMJ height by 5.0% (~1.6 cm) and on SJ height by 6.4% (~1.5 cm; Table 1). These results are consistent with other studies evaluating the effects of caffeine on jump height in trained athletes [39–41]. In particular, our study agrees with that of Bloms et al. [41] who found increases of 4.3% for CMJ height and 5.4% for SJ height. In our study, caffeine increased concentric peak velocity by 1.8% (~0.1 m/s) and peak power by 2.5% (~121.1 W) in the CMJ which may explain why shot putters also obtained better distance with caffeine in the standing shot put [26]. From a practical perspective, enhanced lower limb power performance may be a key factor for better overall shot put performance, as the body's displacement in the flight phase of the throw is highly dependent of the power generated in the lower limbs [37,41]. Additionally, during the putting action, force is transferred to the shot by an explosive drive while the perfect mechanics during for this drive requires the sequential actions of leg extension, rotation of the trunk, and extension of the putting arm are essential to produce [21]. Thus, it seems that caffeine intake is a potent ergogenic aid to increase lower limb power performance in shot put athletes which may constitute an potential advantage for the throw.

Our sample included 8 men and 5 women, as one of the objectives was to provide a study sample that reflects the potential benefits of caffeine for male and female trained shot putters. Women were tested regardless of the phase of the menstrual cycle as it was unfeasible to organize the date of the experimental trials to produce that all women were in the same phase of the menstrual cycle. However, the authors believe that, although this is a limitation of the experiment, the study outcomes were minimally affected by the lack of normalization of participants' menstrual cycle phase. This is because previous research has found that the ingestion of 3 mg/kg/b.m. of caffeine produces a similar benefit during all phases of the menstrual cycle [42,43]. Moreover, other studies found that eumenorrheic females have similar muscle strength and power performance during the different phases of the menstrual cycle [44,45]. Collectively, all this information suggests that the potential performance benefits derived from acute caffeine intake may equally present in women athletes, irrespective of the menstrual cycle phase.

The study design presented different limitations that should be considered when interpreting the utility of caffeine for shot putters. First, the assessment procedures consisted of seven tests performed in succession (handgrip, CMJ, SJ, push-up, backwards throw, standing shot put and complete shot put). Although all tests were short in duration and resting times were set between tests to allow recovery, the all-out nature of all testing and the number of tests may have induced some fatigue that could have dampened the ergogenic effect of caffeine in the later tests. Future studies to examine the acute effects of caffeine on shot put performance could test different physical abilities in several sessions, thus minimizing the effects of accumulated fatigue. Additionally, the assessment of the ergogenic effect of caffeine during the real shot put competition may be necessary as this is the most ecological context. Second, the study was carried out in trained shot putters and results may

not transfer to other throwing events in Athletics, lower-level athletes, or the general population. Third, despite being trained shot putters, the technique could have varied between days due to the fact that it was not analyzed. Fourth, this study did not include blood samples and thus we were unable to determine if participants performed the testing with peak serum caffeine concentrations. Last of all, each individual had different habituation to caffeine (one naïve, three low, eight mild and one moderate consumer [46]). Nevertheless, a secondary analysis comparing groups (naïve/low vs mild/moderate) showed no difference in the ergogenic effects, so habitual caffeine intake did not affect the result of this study.

5. Conclusion

To our knowledge, this is the first study that measures the effect of acute caffeine intake on complete shot put performance with an individualized dose. The findings of this investigation indicate that the pre-exercise intake of 3 mg/kg/b.m. of caffeine increased shot putters' physical performance during the squat jump and countermovement jump and enhanced the distance for the standing shot put. Nevertheless, the effect of caffeine improving the complete shot put performance did not reach statistical significance but revealed a potential practical effect to enhance the distance obtained by 1.0%.

Acknowledgments

The authors wish to thank the subjects for their invaluable contribution to the study.

Disclosure statement

The authors declare no financial relationships with any organizations that might have an interest in the submitted work in the previous 3 years; and no other relationships or activities that could appear to have influenced the submitted work.

Funding

The study was part of the TRAININGCAF project supported by a Grant-in-aid from the Vice-Rectorate of Research and Science, at the Camilo Jose Cela University. Also, it was part of the pre-doctoral scholarships of VG-C.

ORCID

Verónica Giráldez-Costas  <http://orcid.org/0000-0002-8148-1314>

Millán Aguilar-Navarro  <http://orcid.org/0000-0001-9130-9182>

Jaime González-García  <http://orcid.org/0000-0003-1515-9711>

Juan Del Coso  <http://orcid.org/0000-0002-5785-984X>

Juan José Salinero  <http://orcid.org/0000-0003-4153-5100>

References

- [1] Aguilar-Navarro M, Muñoz G, and Salinero JJ, et al. Urine caffeine concentration in doping control samples from 2004 to 2015. *Nutrients Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. 2019;11(2):286.
- [2] Salinero JJ, Lara B, and Del Coso J. Effects of acute ingestion of caffeine on team sports performance: a systematic review and meta-analysis. *Res Sports Med*. 2019;27:238–256.
- [3] Guest NS, VanDusseldorp TA, and Nelson MT, et al. International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance. *J Int Soc Sports Nutr*. 2021;18(1).
- [4] Grgic J, Mikulic P, and Schoenfeld BJ, et al. The influence of caffeine supplementation on resistance exercise: a review. *Sports Med*. 2019;49:17–30.
- [5] Grgic J, Grgic I, and Pickering C, et al. Wake up and smell the coffee: caffeine supplementation and exercise performance—an umbrella review of 21 published meta-analyses. *Br J Sports Med*. 2020;54(11):681–688.
- [6] Baltazar-Martins JG, Brito De Souza D, and Aguilar M, et al. Infographic. The road to the ergogenic effect of caffeine on exercise performance. *Br J Sports Med*. 2020;54:618–619.
- [7] Campbell B, Wilborn C, and La Bounty P, et al. International society of sports nutrition position stand: energy drinks. *J Int Soc Sports Nutr*. 2013;10(1).
- [8] Lara B, Ruiz-Moreno C, and Salinero JJ, et al. Time course of tolerance to the performance benefits of caffeine. *PLoS ONE*. 2019;14(1).
- [9] Grgic J. Caffeine ingestion enhances Wingate performance: a meta-analysis. *Eur J Sport Sci*. 2018;18:219–225.
- [10] Grgic J, Trexler ET, and Lazinica B, et al. Effects of caffeine intake on muscle strength and power: a systematic review and meta-analysis. *J Int Soc Sports Nutr*. 2018;15(1).
- [11] Grgic J. Effects of caffeine on resistance exercise: a review of recent research. *Sports Med*. 2021;51:2281–2298.
- [12] Burke LM, Castell LM, and Casa DJ, et al. International association of athletics federations consensus statement 2019: nutrition for athletics. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. 2019;29:73–84.
- [13] Hanson NJ, Martinez SC, and Byl EN, et al. Increased rate of heat storage, and no performance benefits, with caffeine ingestion before a 10-km run in hot, humid conditions. *Int J Sports Physiol Perform*. 2019;14:196–202.
- [14] Ramos-Campo DJ, Pérez A, and Ávila-Gandía V, et al. Impact of caffeine intake on 800-m running performance and sleep quality in trained runners. *Nutrients*. 2019;11(9).
- [15] Hurst P, Schipof-Godart L, and Hettinga F, et al. Improved 1000-m running performance and pacing strategy with caffeine and placebo: a balanced placebo design study. *Int J Sports Physiol Perform*. 2019;15:483–488.
- [16] Schubert MM, and Astorino TA. A systematic review of the efficacy of ergogenic aids for improving running performance. *J Strength Cond Res*. 2013;27:1699–1707.
- [17] Santos-Mariano AC, Tomazini F, and Rodacki C, et al. Effects of caffeine on performance during high- and long-jump competitions. *Int J Sports Physiol Perform*. 2021;16:1516–1521.
- [18] Bellar DM, Kamimori G, and Judge L, et al. Effects of low-dose caffeine supplementation on early morning performance in the standing shot put throw. *European Journal of Sport Sciences*. 2012;12:57–61.
- [19] Maughan RJ, Burke LM, and Dvorak J, et al. IOC consensus statement: dietary supplements and the high-performance athlete. *Br J Sports Med*. 2018;52:439–455.
- [20] Grgic J, and Mikulic P. Effects of caffeine on rate of force development: a meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports*. 2021;32(4): 644–653.
- [21] O’Shea P, Elam R. The shot put—Mechanics, techniques, strength and conditioning programs. *National Strength Conditioning Assoc J*. 1984;6:4–9.
- [22] Reis VM, and Ferreira AJ. The validity of general and specific strength tests to predict the shot put performance – a pilot study. *Int J Perf Anal*. 2017;3:112–120.

- [23] Mastalerz A, and Sadowski J. Variability of performance and kinematics of different shot put techniques in elite and sub-elite athletes—a preliminary study. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19:1751.
- [24] Judge LW, Bellar D, Thrasher AB, et al. A pilot study exploring the quadratic nature of the relationship of strength to performance among shot putters. *Int J Exerc Sci*. 2013;6:171–179.
- [25] Terzis G, Georgiadis G, and Vassiliadou E, et al. Relationship between shot put performance and triceps brachii fiber type composition and power production. *Eur J Appl Physiol*. 2003;90:10–15.
- [26] Kyriazis TA, Terzis G, and Boudolos K, et al. Muscular power, neuromuscular activation, and performance in shot put athletes at preseason and at competition period. *J Strength Cond Res*. 2009;23:1773–1779.
- [27] Judge LW, and Bellar D. Variables associated with the of personal best performance in the glide and spin shot put for U.S. collegiate throwers. *Int J Perf Anal*. 2017;12:37–51.
- [28] Granfors MT, Backman JT, and Laitila J, et al. Oral contraceptives containing ethinyl estradiol and gestodene markedly increase plasma concentrations and effects of tizanidine by inhibiting cytochrome P450 1A2. *Clin Pharmacol Ther*. 2005;78:400–411.
- [29] Bühler E, Lachenmeier DW, Schlegel K, et al. Entwicklung eines instruments zur Abschätzung der Koffeinaufnahme von Jugendlichen und jungen Erwachsenen. *Ernahr Umsch*. 2014;61:58–63.
- [30] Salinero JJ, Lara B, Abian-Vicen J, et al. The use of energy drinks in sport: perceived ergogenicity and side effects in male and female athletes. *Br J Nutr*. 2014 Cambridge University Press;112:1494–1502.
- [31] Hopkins WG. A scale of magnitudes for effect statistics [Internet]. 2002; [cited 2022 May 5]. Available from: <http://www.sportsci.org/resource/stats/>
- [32] Bang H, Ni L, and Davis CE. Assessment of blinding in clinical trials. *Control Clin Trials*. 2004;25:143–156.
- [33] Hopkins WG. Competitive Performance of Elite Track-and-Field Athletes: Variability and Smallest Worthwhile Enhancements. *SPORTSCIENCE*. 2005;9:17–20. [cited 2022 May 10]. <http://sportsci.org/jour/05/wghtrack.htm>
- [34] Grgic J, and Mikulic P. Caffeine ingestion acutely enhances muscular strength and power but not muscular endurance in resistance-trained men. *Eur J Sport Sci*. 2017;17:1029–1036.
- [35] Wilk M, Filip A, and Krzysztofik M, et al. Acute caffeine intake enhances mean power output and bar velocity during the bench press throw in athletes habituated to caffeine. *Nutrients*. 2020;12:406.
- [36] Muñoz A, López-Samanes Á, and Pérez-López A, et al. Effects of caffeine ingestion on physical performance in elite women handball players: a randomized, controlled study. *Int J Sports Physiol Perform*. 2020;15:1406–1413.
- [37] Schofield M, Cronin JB, and Macadam P, et al. Rotational shot put: a phase analysis of current kinematic knowledge. *Sports Biomech*. 2022;21:1–19.
- [38] Błazkiewicz M, Łysoń B, and Chmielewski A, et al. Transfer of mechanical energy during the shot put. *J Hum Kinet*. 2016;52:139–146.
- [39] Del Coso J, Pérez-López A, and Abian-Vicen J, et al. Enhancing physical performance in male volleyball players with a caffeine-containing energy drink. *Int J Sports Physiol Perform*. 2014;9:1013–1018.
- [40] Sabol F, Grgic J, and Mikulic P. The effects of 3 different doses of caffeine on jumping and throwing performance: a randomized, double-blind, crossover study. *Int J Sports Physiol Perform*. 2019;14:1170–1177.
- [41] Bloms LP, Fitzgerald JS, and Short MW, et al. The effects of caffeine on vertical jump height and execution in collegiate athletes. *J Strength Cond Res*. 2016;30:1855–1861.
- [42] Lara B, Gutiérrez-Hellín J, and García-Bataller A, et al. Ergogenic effects of caffeine on peak aerobic cycling power during the menstrual cycle. *Eur J Nutr*. 2020;59:2525–2534.
- [43] Lara B, Gutiérrez-Hellín J, and Ruíz-Moreno C, et al. Acute caffeine intake increases performance in the 15-s Wingate test during the menstrual cycle. *Br J Clin Pharmacol*. 2020;86:745–752.
- [44] Romero-Moraleda B, Del Coso J, and Gutiérrez-Hellín J, et al. The influence of the menstrual cycle on muscle strength and power performance. *J Hum Kinet*. 2019;68:123–133.

- [45] García-Pinillos F, Bujalance-Moreno P, and Lago-Fuentes C, et al. Effects of the menstrual cycle on jumping, sprinting and force-velocity profiling in resistance-trained women: a preliminary study. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(9):4830.
- [46] Filip A, Wilk M, and Krzysztofik M, et al. Inconsistency in the ergogenic effect of caffeine in athletes who regularly consume caffeine: is it due to the disparity in the criteria that defines habitual caffeine intake? *Nutrients*. 2020;12:1087.