

# Efecto de la intensidad del contramovimiento sobre el rendimiento del salto vertical

*Effect on the Intensity of Countermovement on Vertical Jump Performance*

**MARCOS GUTIÉRREZ-DÁVILA**  
**FRANCISCO JAVIER GILES GIRELA**  
**CARMEN GONZÁLEZ ROPERO**  
**DIEGO JESÚS GALLARDO ROMÁN**  
**FRANCISCO JAVIER ROJAS RUIZ**

Departamento de Educación Física y Deportiva  
Universidad de Granada (España)

Correspondencia con autor

Francisco Javier Rojas Ruiz  
[frojas@ugr.es](mailto:frojas@ugr.es)

## Resumen

El propósito de esta investigación ha sido comprobar el efecto de la intensidad del contramovimiento sobre el rendimiento del salto vertical. Para el control de la intensidad se han utilizado tres protocolos de saltos verticales con participación de brazos: a) saltos verticales partiendo desde la posición de erguidos (CMJ + S); b) partiendo de un salto previo donde la altura de caída estaba regulada por el participante (DJ-AR), y c) partiendo de un salto previo máximo (DJ-M). Han participado 28 deportistas practicantes de modalidades deportivas donde el salto vertical constituye una habilidad básica. Se ha utilizado una plataforma de fuerza, operando a 500 Hz, sincronizada temporalmente a una cámara de vídeo, que registraba a 210 Hz el plano sagital de los saltos realizados sobre la plataforma. La aceleración vertical del CM se determinó a partir de la fuerza neta vertical y la masa del saltador. A continuación, los sucesivos registros de la velocidad vertical y las posiciones de componente vertical adoptadas por el CM se determinaron mediante integración de las componentes verticales de las funciones de aceleración-tiempo y velocidad-tiempo, respectivamente. Las constantes de integración se determinaron mediante imágenes de vídeo (2D). Los resultados han puesto de manifiesto que, cuando se realizan saltos con alturas de caída superiores a  $0,39 \pm 0,05$  m, el pico de potencia durante la fase propulsiva ( $PP_{(PROPULSIVA)}$ ), el impulso vertical de propulsión ( $Iv_{(PROPULSION)}$ ), y la altura de salto ( $Y_{CM\ vuelo}$ ), se reducen de forma significativa ( $p < 0,001$ ), lo que nos permite afirmar que se reduce el rendimiento durante la fase propulsiva.

**Palabras clave:** biomecánica, fuerza, impulso, salto vertical

## Abstract

*Effect on the Intensity of Countermovement on Vertical Jump Performance*

*The purpose of this research was to determine the effect of the intensity of countermovement on vertical jump performance. Three conditions of vertical jumps involving arms were used to control the countermovement's intensity: a) Vertical jumps starting from the upright position (CMJ + S), b) based on a previous jump where the drop height was regulated by the participant, (DJ- AR) and c) starting from a previous maximum jump (DJ- M). 28 athletes practicing different sports, where vertical jumping is a basic skill, were involved in this study. A force platform, operating at 500 Hz and temporally synchronised to a video camera which recorded the sagittal plane of the jumps on the platform at 210 Hz, were used. The vertical acceleration of the CM was determined from the net vertical force and the mass of the jumper. Successive vertical velocity and positions were calculated by integration of the vertical components of the acceleration-time and velocity-time functions respectively. The integration constants were determined by video images (2D). The results have shown that when jumps with drop heights exceeding  $0.39 \pm 0.05$  m were performed, peak power during the propulsive phase, vertical impulse and jump height was significantly reduced ( $p < 0.001$ ), which means that performance is reduced during the propulsive phase.*

**Keywords:** biomechanics, force, impulse, vertical jump

## Introducción

Es conocido que, en los movimientos donde se requiere una gran aceleración, el contramovimiento constituye un factor que permite incrementar la eficacia mecánica y la potencia durante la actividad muscular concéntrica. La explicación de este hecho puede tener una base mecánica y otra neurofisiológica. Dicha base mecánica se fundamenta en el principio de fuerza inicial (Hochmuth, 1967), donde se constata que la realización del contramovimiento produce un impulso de frenado que permite incrementar la fuerza externa antes de iniciar el impulso de aceleración. La consecuencia es que el impulso total de aceleración aumenta, siempre que la transición entre los impulsos se realice de forma fluida.

La explicación neurofisiológica tiene sus orígenes en la activación del reflejo miotático de estiramiento y las investigaciones de Cavagna, Dusman y Margaria (1968), donde se pone de manifiesto que el estiramiento rápido de un músculo aislado produce un almacenamiento de energía elástica que facilita el incremento de su potencia durante la posterior contracción concéntrica, lo que se ha denominado como ciclo estiramiento-acortamiento. Sin lugar a dudas, esta explicación neurofisiológica ha sido la que más interés ha despertado por parte de los investigadores, aunque existen ciertas dificultades al generalizarla cuando se trata de movimientos complejos. Conocedores de estas dificultades, la mayoría de los protocolos utilizados para el salto vertical limitan la participación segmentaria (acción de brazos), tratando de reducir la cadena cinética y focalizar el contramovimiento en los músculos extensores de la rodilla.

Desde la perspectiva neurofisiológica, los protocolos más habituales para los saltos con contramovimiento, son los que se realizan sin participación de los brazos y partiendo desde la posición de erguido (*counter movement jumps*, CMJ) o partiendo desde una cierta altura de caída (*drop jumps*, DJ). En los saltos DJ, el trabajo negativo y el almacenamiento de la energía elástica se incrementa a medida que aumenta la altura de caída, facilitando así una mayor liberación de energía elástica durante la fase concéntrica. Sin embargo, cuando la altura previa es excesiva, el trabajo se disipa en forma de calor en lugar de almacenarse en forma de energía elástica (Moran & Wallace, 2007; Van Ingen Schenau, Bobbert, & Haan, 1997; Waller, Gersick, & Holman, 2013).

Aunque existen ciertas discrepancias, los estudios previos parecen consensuar que la altura de caída, a partir de la cual no existe mejora en el rendimiento del

salto, estaría comprendida entre 0.3 y 0.4 m. En este sentido, Bobbert, Huijting y Van Ingen Schenau, (1987) no encontraron diferencias en el rendimiento entre saltos DJ sin acción de brazos, con alturas de caída entre 0,2, 0,4 y 0,6 m. Lees y Fahmi (1994), comparando saltos verticales tras caída desde alturas comprendidas entre 0,12 y 0,68 m sin acción de brazos, constataron que los saltos con caída desde 0,12 m, producen la mayor altura de salto y potencia vertical durante la fase concéntrica. Voigt, Simonsen, Dyhre-Poulsen y Klausen (1995) han puesto de manifiesto que los saltos (CMJ) y DJ, con caídas inferiores a 0.30 m y sin acción de brazos, producen rendimientos superiores a los saltos DJ con caídas superiores a 0,60 m. Peng (2011), utilizando salto DJ con caídas de 0,2 m, 0,3 m, 0,4 m, 0,5 m y 0,6 m y sin acción de brazos, sugiere que las caídas superiores a 0,40 m no producen beneficios.

Walsh, Arampatzis, Schade y Bruggemann (2004), utilizando un diseño bifactorial, donde se comparan saltos con caída desde 0,2, 0,4 y 0,6 m y diferentes tiempos de batida sin acción de brazos, no encontraron diferencias significativas entre los saltos DJ cuando se incrementaba la altura de caída, siendo el tiempo de batida el factor que condicionaba el rendimiento del salto, independientemente de la altura de caída. De este modo, se introduce un nuevo factor de rendimiento que estaría relacionado con la técnica de ejecución. En este sentido, Waller et al. (2013) consideran que el tiempo de acoplamiento entre las fases puede variar en función de los objetivos pretendidos, aunque, en la fase final del contramovimiento, debe existir una rápida contracción muscular que permita la propulsión vertical. Estos resultados nos permiten considerar que utilizando protocolos sin restricción segmentaria (con acción de brazos), la intensidad óptima del contramovimiento podría variar. Es sabido que la participación segmentaria en los saltos verticales, incrementa el tiempo de batida y la velocidad de despegue del centro de masa (CM) (Aragón-Vargas, 2000; Hara, Shibayama, Takeshita, & Fukashiro, 2006; Gutiérrez-Dávila, Gutiérrez-Cruz, Garrido, Giles y Rojas, 2012), lo que nos sugiere que un incremento del tiempo de aplicación de fuerzas podría modificar el impulso vertical y, consecuentemente, el rendimiento del salto, independientemente de la altura previa de caída.

Otro aspecto crítico a considerar sobre las investigaciones precedentes, hace referencia al protocolo utilizado para los saltos DJ, donde las alturas de caída se suelen bloquear a unos valores determinados (0,20, 0,30, 0,40, 0,50 m..., etc.), sin considerar las características

individuales como: el nivel de coordinación, la fuerza máxima, la masa desplazada o la potencia máxima que desarrolla cada participante. En este estudio pretendemos modificar los protocolos DJ, haciendo que sea el propio participante el que considere la altura de caída óptima que le permita desarrollar el máximo rendimiento en el salto, mediante la realización de un salto previo autorregulado (DJ-AR) y un salto previo máximo que permita alcanzar una altura de caída posterior condicionada por las características individuales de cada participante (DJ-M). Este tipo de protocolo con salto previo ha sido considerado como uno de más apropiados para el análisis de actividades pliométricas que implican el ciclo estiramiento-acortamiento (Wallace et al., 2010).

Por otra parte, es necesario tener en cuenta que, durante los saltos verticales, la masa de los segmentos superiores está sujeta a ciertas aceleraciones verticales (fuerza inercial) que reducen las fuerzas comprensivas durante el periodo de contramovimiento y las incrementa durante la propulsión vertical, lo que contribuiría a incrementar la velocidad de estiramiento de la musculatura extensora de los miembros inferiores, así como a reducir su posterior velocidad de acortamiento (Dapena & Chung, 1988). Dos condiciones que aumentaría la tensión muscular (Komi, 1984). En este sentido, Lees, Vanrenterghem y De Clercq (2004) consideran que la acción de brazos facilitaría el retorno de una energía elástica muscular que habría sido almacenada previamente por el incremento de la tensión producida durante la aceleración vertical de los brazos. Así, a partir de las fuerzas inerciales desarrolladas por los segmentos libres superiores, sería posible incrementar el trabajo negativo y la acumulación de energía elástica, a partir de alturas inferiores a las reportadas por los investigadores que han utilizado protocolos con restricción segmentaria.

El propósito de esta investigación ha sido comprobar el efecto que tiene la intensidad del contramovimiento sobre el impulso vertical de aceleración ( $IV_{(A)}$ ), el pico de potencia durante la propulsión (PP) y la altura de salto. Utilizando para ello tres protocolos de saltos verticales con participación de brazos y niveles de intensidad del contramovimiento ajustados a las características físicas individuales de los participantes. Aunque no tenemos datos concluyentes que nos permitan predecir el efecto que tiene la intensidad del contramovimiento utilizando protocolos con participación libre de los segmentos, se propone como hipótesis que la altura de salto, el  $IV_{(A)}$  y el PP, serán más reducidos cuando se utilizan saltos previos máximos (DJ-M).

## Método

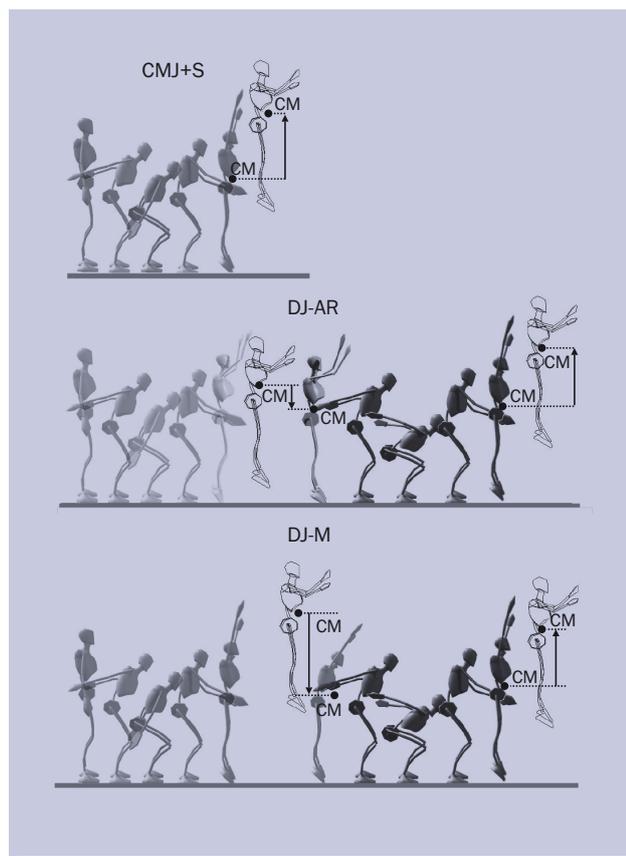
### Participantes

Han participado 28 estudiantes masculinos de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte de la Universidad de Granada (edad =  $21,4 \pm 2,1$  años; talla =  $1,79 \pm 0,05$  m; masa =  $71,2 \pm 6,9$  kg; IMC =  $22,3 \pm 1,8$  kgm<sup>-2</sup>), utilizando para su selección el criterio de haber participado de forma regular en actividades deportivas donde el salto vertical constituye una habilidad básica (voleibol, baloncesto, balonmano, fútbol, gimnasia y atletismo). A todos los participantes se les informó y solicitó su consentimiento para participar en este estudio siguiendo las directrices de la Comisión Ética de la Universidad.

### Material y procedimientos

Se ha utilizado una plataforma de fuerza de  $0,6 \times 0,37$  m, Dinascan/IBV, operando a 500 Hz, sincronizada temporalmente a una cámara de vídeo Casio EX - FH20, que registraba a 210 Hz el plano sagital de los saltos realizados sobre la plataforma. Después de un calentamiento normalizado de quince minutos, los participantes debían de realizar tres tipos de saltos con intensidades de contramovimiento diferentes: *a*) los participantes debían de realizar un salto vertical máximo partiendo desde la posición de erguidos y con acción libre de los brazos (CMJ+S); *b*) en este protocolo, los participantes debían de realizar dos saltos consecutivos con libre acción de los brazos e intentando alcanzar la máxima altura en el segundo de ellos, mientras que la altura del primero estaría regulada libremente por el participante, aunque era obligatorio despegar de la plataforma en el salto previo (DJ-AR), y *c*) finalmente, para este protocolo se solicitó a los participantes que realizaran dos saltos consecutivos máximos (DJ-M). En la *figura 1* se presentan los tres tipos de saltos.

Antes de comenzar las sesiones de registro, se efectuó un proceso de aprendizaje del modelo de salto, así como de adaptación a los sistemas de registro. Siguiendo a Schmidt y Lee (2011), este proceso de aprendizaje finalizó cuando se alcanzaba una estabilidad en los tiempos de batida. Se realizó una sesión de cinco saltos válidos para cada tipo de salto, con una recuperación de 2 minutos entre ensayo y de 10 minutos entre sesión. Sólo se analizó el ensayo cuyo registro del tiempo de vuelo era el mediano de los cinco ensayos registrados en cada sesión. El orden de los tres tipos de saltos propuestos para cada sesión fue alterado entre los sujetos.



▲ **Figura 1.** Representación gráfica de los tres tipos de salto

### Análisis de datos

Para cada ensayo, se determinó el posible error sistemático procedente de la plataforma de fuerzas a partir de la media de la fuerza vertical ( $F_y$ ) de 20 registros sucesivos tras el despegue. Después de restar el posible error sistemático y el peso del sujeto, en cada tipo de salto (CMJ+S; DJ-AR y DJ-M), se determinó la aceleración vertical del CM, a partir de  $F_y$  y la masa del saltador. Finalmente, los sucesivos registros de la velocidad vertical y las posiciones de componente vertical adoptadas por el CM ( $v_{(y)CM}$  y  $Y_{CM}$ , respectivamente), se determinaron mediante integración de las componentes verticales de las funciones de aceleración-tiempo y velocidad-tiempo, respectivamente, usando para ello el método trapezoidal con un incremento temporal de 0,002 s. Las constantes de integración se determinaron mediante imágenes de vídeo (2D). Para CMJ+S y los saltos previos de DJ-AR y DJ-M, se utilizó la altura del CM en la posición inicial de cada participante y velocidad cero. Para la determinación de las constantes de integración

de los saltos DJ-AR y DJ-M, se utilizó la altura y la velocidad vertical del CM en el instante de tomar contacto con la plataforma.

Para determinar la posición inicial del CMJ+S y del salto previo de DJ-AR y DJ-M, se digitalizó manualmente una imagen de vídeo antes de iniciarse el movimiento, utilizando para ello el modelo y parámetros inerciales propuestos por Zatsiorsky y Seluyanov (1983) y adaptados por de Leva (1996). Para determinar la posición del CM en la toma de contacto de los saltos DJ-AR y DJ-M, se digitalizaron doce imágenes consecutivas durante la recepción, donde la sexta imagen correspondía a la toma de contacto con la plataforma. Así, el contacto se produce durante el intervalo comprendido entre la 5ª y 6ª imagen (un intervalo de 0,0047 s). Las coordenadas planas de las doce imágenes fueron suavizadas mediante un filtro digital de paso bajo, a 8 Hz (Winter, 1990). Las posiciones del CM para cada imagen se determinaron utilizando el mismo modelo y parámetros inerciales utilizados para el salto CMJ+S. Finalmente, la posición inicial del CM fue el valor medio de las posiciones del CM correspondientes a la 5ª y 6ª imagen. La velocidad vertical instantánea del CM se determinó mediante la primera derivada de la posición vertical del CM, con respecto al tiempo (mitad del intervalo entre la 5ª y 6ª imagen), utilizando para ello las funciones quintic splines con suavizado cero (Wood & Jennings, 1979). Para la conversión de las coordenadas digitales en datos reales, se filmó un sistema de referencia consistente en un cubo de  $2 \times 2 \times 0,5$  m.

El análisis temporal de los saltos se ha dividido en tres fases, siguiendo la metodología propuesta por Felner, Bishop y Pérez (2004): a) *Contramovimiento*, que comprende desde el inicio del movimiento hasta que la velocidad vertical del CM adquiere un su valor más próximo a cero ( $t_{0Y}$ ); b) *Propulsión* ( $t_{(PROPULSION)}$ ), que comprende un periodo temporal entre  $t_{0Y}$  y el instante en que la velocidad vertical del CM alcanza su máximo valor ( $t_{MV}$ ) y c) *Previa al despegue* ( $t_{(PREVIO-DESPEGUE)}$ ), comprendida entre  $t_{MV}$  y el instante de despegue ( $t_{DE}$ ). Para un análisis más detallado la fase de contramovimiento, esta se ha dividido en dos periodos temporales:  $a_1$ : Periodo de *contramovimiento inicial*, que comprende desde el inicio del movimiento hasta el instante donde la velocidad vertical del CM alcanza su máximo valor negativo ( $t_{NV}$ ) y  $a_2$ : Periodo de *contramovimiento final*, ( $t_{(CONTRAM.-FINAL)}$ ) que comprende desde  $t_{NV}$  hasta  $t_{0Y}$ . En la *figura 2* se representan los instantes que definen las citadas fases para los saltos

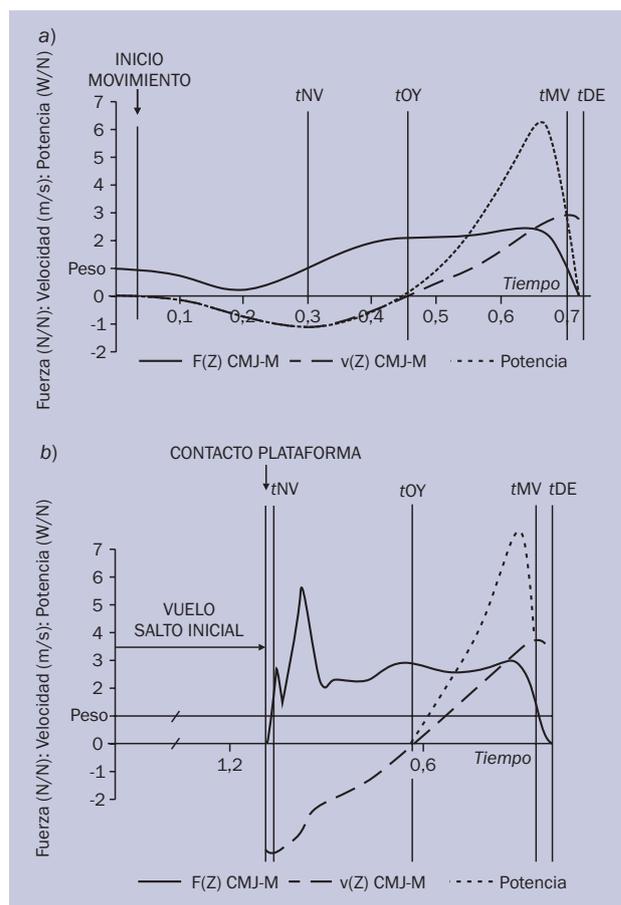
CMJ+S (a) y los realizados desde alturas previas (CMJ-AR y CMJ-M) (b), junto a los registros de la fuerza vertical ( $F_{(y)}$ ) y la potencia desarrollada durante la fase de propulsión, normalizadas con respecto al peso corporal, así como la componente vertical de la velocidad del CM ( $v_{(y)}$ ), para uno de los sujetos analizados.

El desplazamiento vertical del CM durante el vuelo y la altura de caída del CM, para los saltos DJ-AR y DJ-M, se ha considerado como el máximo desplazamiento vertical del CM durante el vuelo de cada tipo de salto y del salto previo ( $Y_{CM}$  *vuelo* y  $Y_{CM}$  *caída*, respectivamente), utilizando para ello la velocidad vertical instantánea de despegue (mitad del intervalo de las dos imágenes en que se produce el despegue). El impulso vertical desarrollado en cada fase, ( $Iv_{(CONTRAM.-INI.)}$ ,  $Iv_{(CONTRAM.-FIN.)}$ ,  $Iv_{(CONTRAM.-INI.)}$  y  $Iv_{(PROP.+PREVIO-DESP.)}$ , respectivamente), se han determinado mediante la integración de la función  $F_{(y)}$  con respecto al tiempo que duran las respectivas fases, usando para ello el método trapezoidal con un incremento temporal de 0,002 s. La fuerza registrada antes de comenzar la fase de propulsión ( $Fv_{(PREVIA-PROPULSIÓN)}$ ), se ha normalizado con respecto al peso de los participantes. El pico máximo de potencia durante la fase de propulsión ( $PP_{(PROPULSIÓN)}$ ), se ha considerado como el máximo valor del producto de la fuerza neta y la velocidad vertical durante la fase de propulsión.

## Análisis estadístico

Para evaluar la fiabilidad de las pruebas, se ha aplicado un análisis de varianza de medidas repetidas a todos los ensayos en las tres condiciones experimentales (cinco ensayos para cada condición), tomando como variable dependiente el tiempo de batida, no existiendo diferencias significativas entre los ensayos. El coeficiente de correlación intraclase para esta misma variable, ha sido de 0,967 ( $p < 0,001$ ) para CMJ + S, de 0,985 ( $p < 0,001$ ) para el DJ-AR y de 0,977 ( $p < 0,001$ ) para DJ-M.

Se han calculado la media y desviación típica para cada variable en cada situación experimental, determinándose las diferencias entre las medias de los tres niveles de la variable (CMJ+S; DJ-AR; DJ-M), mediante un análisis de varianza de medidas repetidas (ANOVA). Un análisis múltiple de contrastes posterior determinó entre qué grupos se encontraban las diferencias. El nivel de significación se ha establecido en  $p < 0,05$ . Se ha utilizado el paquete estadístico Statgraphic Plus 5.1 para Windows.



**Figura 2.** Representación gráfica de (a) los instantes que definen las fases para los saltos CMJ+S y (b) los realizados desde alturas previas (CMJ-AR y CMJ-M)

## Resultados

En la *tabla 1* se presentan los datos de tendencia central y nivel de significación, relativos a las diferentes alturas de caída y los tiempos referidos a las fases y periodos temporales en que se han dividido los tres tipos de saltos. Como se esperaba, según los protocolos propuestos para cada salto, han existido claras diferencias en la altura de caída ( $Y_{CM}$  *caída*) entre todas las condiciones de salto. Algo similar ocurre con el tiempo de contramovimiento inicial ( $t_{(CONTRAM.-INI.)}$ ), destacando que, además de las diferencias obligadas debidas al protocolo CMJ+S, también han existido diferencias significativas entre los saltos DJ-AR y DJ-M, siendo significativamente superior ( $p < 0,001$ ), cuando la altura del salto previo ha estado regulado por el propio participante (DJ-AR). El tiempo de contramovimiento final ( $t_{(CONTRAM.-FIN.)}$ ), ha sido superior para la condición DJ-M, con respecto a las otras dos ( $p < 0,001$ ), mientras que no ha existido diferencia

Variables	CMJ+S	DJ-AR	DJ-M	F
$Y_{cg}$ caída (m)	0,00 ± 0,00	0,141 ± 0,06	0,39 <sup>1,2</sup> ± 0,05	470,7***
$t_{(CONTRAM.-INI.)}$ (s)	0,461 ± 0,129	0,0441 ± 0,022	0,011 <sup>1,2</sup> ± 0,010*	303,4***
$t_{(CONTRAM.-FIN.)}$ (s)	0,190 ± 0,056	0,198 ± 0,078	0,286 <sup>1,2</sup> ± 0,086*	16,3***
$t_{(CONTRAMOVIMIENTO)}$ (s)	0,652 ± 0,145	0,2421 ± 0,084	0,297 <sup>1,2</sup> ± 0,086	173,5***
$t_{(PROPULSIÓN)}$ (s)	0,279 ± 0,050	0,2391 ± 0,065	0,269 <sup>2</sup> ± 0,054	7,8**
$t_{(PREVIO-DESPEGUE)}$ (s)	0,024 ± 0,004	0,025 ± 0,004	0,025 ± 0,004	3,23

\*\*\*  $p < 0,001$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*  $p < 0,05$ ; <sup>1,2</sup> indica diferencias significativas entre los grupos ( $p < 0,05$ ).

**Tabla 1.** Estadística descriptiva y análisis de varianza multifactorial (ANOVA de medidas repetidas), para la altura de caída ( $Y_{cg}$  caída) y los valores temporales de las fases en que se han dividido tres condiciones de salto (CMJ+S, DJ-AR y DJ-M)

entre las condiciones CMJ + S y DJ-AR. Con respecto al tiempo utilizado durante la fase de propulsión ( $t_{(PROPULSIÓN)}$ ), solo han habido diferencias estadísticamente significativas entre la condición DJ-AR, con respecto a las demás condiciones de salto ( $p < 0,01$ ). No han existido diferencias significativas entre los tiempos utilizados en la fase previa al despegue para las tres condiciones de salto ni comparando por pares las diferentes condiciones.

En la *tabla 2* se presentan los datos de tendencia central y nivel de significación de las variables cinemáticas y dinámicas más significativas. Han existido claras diferencias estadísticas en la posición del CM en el instante de la recepción ( $Y_{CM}$  recepción) entre los tres tipos de salto ( $p < 0,001$ ). Como se esperaba según las diferencias propuesta en el protocolo, el  $Y_{CM}$  recepción, ha sido inferior en la condición CMJ+S con respecto a las otras dos condiciones, aunque también existen claras diferencias entre las dos condiciones restantes, siendo mayor en la condición DJ-M. La velocidad vertical del CM en el instante de tomar contacto con la plataforma de fuerza ( $v_{(Y_{CM} recepción)}$ ) ha sido superior para la condición DJ-M, con respecto a DJ-AR ( $p < 0,001$ ). Al ser cero la velocidad en la condición CMJ+S, según el protocolo, no se ha considerado para esta estadística. La máxima altura alcanzada por el CM durante el vuelo, ( $Y_{CM}$  vuelo), ha sido significativamente menor para la condición DJ-M, con respecto a las otras dos condiciones ( $p < 0,001$ ). La prueba de contrastes aplicada a esta variable, pone de manifiesto que no existen diferencias estadísticamente significativas cuando comparan las alturas medias alcanzadas entre las condiciones CMJ+S y DJ-AR. No se han encontrado diferencias estadísticamente significativas en la altura del CM en el instante del despegue ( $Y_{CM}$  despegue). Se han encontrado ciertas diferencias en la altura mínima alcanzada por el CM durante la batida ( $Y_{CM}$  mínima), siendo la posición más alta la alcanzada

en la condición DJ-AR, con respecto a las otras dos. La prueba de contrastes indica que no hay diferencias entre las condiciones CMJ+S y DJ-M.

Con respecto a los impulsos verticales desarrollados para cada una de las fases en que se han dividido los tres tipos de saltos, el impulso vertical desarrollado durante el periodo de contramovimiento inicial ( $Iv_{(CONTRAM.-INI.)}$ ), ha sido significativamente diferente entre las tres condiciones propuestas ( $p < 0,001$ ), siendo mayor para la condición CMJ+S e inferior par la condición DJ-M. Todo lo contrario que ocurre con el impulso vertical desarrollado durante el periodo de contramovimiento final ( $Iv_{(CONTRAM.-FIN.)}$ ), siendo el valor medio más alto el registrado en la condición DJ-M y el más reducido en la condición CMJ + S. También han existido claras diferencias entre los valores medios del impulso vertical de propulsión ( $Iv_{(PROPULSIÓN)}$ ), aunque la prueba de contrastes pone de manifiesto que sólo existen diferencias estadísticamente significativas cuando se comparan los datos obtenidos en la condición DJ-M, con respecto a los otros dos. No se han encontrado diferencias estadísticamente significativas para el impulso vertical desarrollado durante la fase previa al despegue ( $Iv_{(PREVIO-DESPEGUE.)}$ ).

En la *tabla 2* también se presenta la fuerza vertical alcanzada en el instante de comenzar la fase de propulsión, expresada con respecto al peso de cada participante ( $F_{(PREVIA-PROPULSIÓN)}$ ). Los datos ponen de manifiesto que existen claras diferencias ente las medias ( $p < 0,001$ ), aunque la prueba de contrastes solo nos permite afirmar que existen diferencias entre los valores obtenidos en la condición DJ-AR con respecto a las otras dos condiciones. Finalmente, con respecto al pico de potencia alcanzado durante la fase propulsiva ( $PP_{(PROPULSIVA)}$ ), solo han existido diferencias estadísticamente significativas entre los valores registrados para la condición DJ-M, con respecto a las otros dos tipos de saltos ( $p < 0,01$ ).

Variables	CMJ	DJ-AR	DJ-M	F
$Y_{CM}$ recepción (m)	1,09 ± 0,038	1,131 ± 0,061	1,201,2 ± 0,074	47,87***
$v_{(Y)CM}$ recepción (m)	–	-1,920 ± 0,350	-2,882 ± 0,22	292,7***
$Y_{CM}$ vuelo (m)	0,40 ± 0,05	0,39 ± 0,06	0,361,2 ± 0,05*	12,20***
$Y_{CM}$ despegue (m)	1,23 ± 0,04	1,22 ± 0,07	1,22 ± 0,07	0,15
$Y_{CM}$ mínima (m)	0,76 ± 0,07	0,801 ± 0,09	0,772 ± 0,08	5,00*
$Iv_{(CONTRAM-FIN)}$ (Ns)	-79,1 ± 22,7	-15,31 ± 8,4	-2,91,2 ± 2,6	203,4***
$Iv_{(CONTRAM-FIN)}$ (Ns)	75,1 ± 22,1	146,51 ± 25,4	202,51,2 ± 24,6	463,9***
$Iv_{(PROPULSIÓN)}$ (Ns)	212,3 ± 26,8	208,3 ± 29,6	199,41,2 ± 27,5*	11,9***
$Iv_{(PREVIO-DESPEGUE)}$ (Ns)	7,7 ± 2,6	8,5 ± 2,0	8,1 ± 2,7	0,94
$Fv_{(PREVIA-PROPULSIÓN)}$ (N/N)	2,08 ± 0,22	2,581 ± 0,49*	1,232 ± 0,37	18,34***
$PP_{(PROPULSIÓN)}$ (W)	4195 ± 674	4176 ± 959	38691,2 ± 633	6,03**

\*\*\*  $p < 0,001$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*  $p < 0,05$ ; <sup>1,2</sup> indica diferencias significativas entre los grupos ( $p < 0,05$ ).

**Tabla 2.** Estadística descriptiva y análisis de varianza multifactorial (ANOVA de medidas repetidas), para las variables biomecánicas en las tres condiciones de contramovimiento (CMJ, DJ-AR y DJ-M)

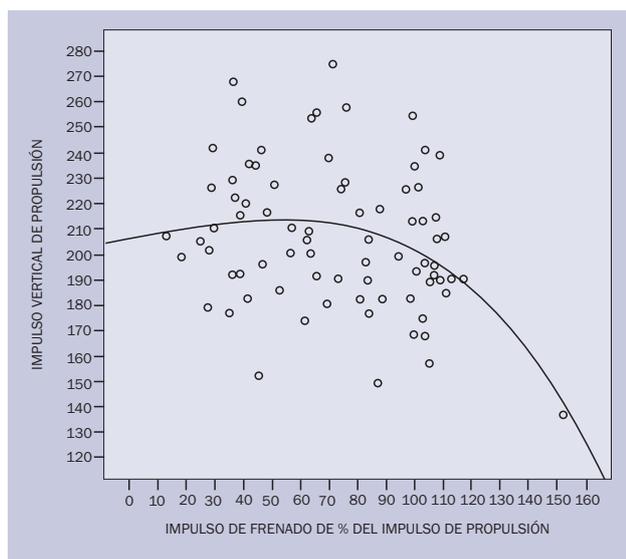
## Discusión

Según los resultados expuestos, cuando se realizan saltos con alturas de caída superiores a  $0,39 \pm 0,05$  m, el pico de potencia durante la fase propulsiva ( $PP_{(PROPULSIÓN)}$ ), el impulso vertical de propulsión ( $Iv_{(PROPULSIÓN)}$ ), y la altura de salto ( $Y_{CM}$  vuelo), se reducen de forma significativa, lo que nos permite afirmar que se reduce el rendimiento durante la fase propulsiva. Estos resultados son coincidentes con los expuestos por Lees y Fahmi (1994), Voigt, Simonsen, Dyhre-Poulsen y Klausenf (1995) y Peng (2011). Sin embargo, son contradictorios con las aportaciones de Bobbert, Huijing, y Van Ingen Schenau (1987), al no encontrar diferencias en el rendimiento entre saltos DJ con alturas de caída entre 0,2, 0,4 y 0,6 m, aunque, como expone Peng (2011), estas discrepancias pueden obedecer al número reducido de la muestra (seis participantes). Los datos también ponen de manifiesto que el rendimiento no varía cuando se comparan las situaciones CMJ+S y DJ-AR, es decir cuando el movimiento previo está autoregulado, con independencia de la intensidad del contramovimiento, lo que es coincidente con las aportaciones de Ebben, Blackard y Jensen (1999) al considerar que, para obtener el máximo rendimiento en los saltos con contramovimiento, debe de existir que un umbral de intensidad, que se ha descrito como tensión excéntrica esencial mínima.

Desde la perspectiva neurofisiológica, la explicación a la reducción del rendimiento cuando las alturas de caída sobrepasan ciertos valores, estaría relacionada con la

transformación del trabajo excéntrico en calor, en lugar de almacenarse como energía elástica para ser reutilizado durante la fase concéntrica (Van Ingen Schenau, Bobbert & Haan, 1997). A esta consideración, habría que añadir la posible inhibición neural y posible desprendimiento de los puentes cruzados ante una fuerza excéntrica excesiva, por encima de la fuerza máxima excéntrica (Sousa, Ishikawa, Vilas-Boas, & Komi (2007). Nuestros datos refuerzan esta explicación neurofisiológica, al constatarse que, en la condición DJ-M, la velocidad vertical y la posición del CM, en el instante de la recepción, registran los datos más elevados, mientras que el tiempo de contramovimiento inicial es el más reducido (ver *tablas 1 y 2*). Así, el ritmo de fuerza excéntrica desarrollado durante el aterrizaje (primer pico registrado por las fuerzas de reacción dividido por el tiempo que tarda en producirse, descrito por Jensen & Ebben, 2007), sería más elevado de las tres condiciones, lo que nos permite considerar que el tiempo entre la toma de contacto y el posterior apoyo del talón, tiende a reducirse cuando se utiliza el salto DJ-M. Un hecho que nos sugiere una falta amortiguación en los primeros instantes de la recepción y un mayor riesgo de lesiones (Granata, Wilson, & Padua, 2002).

Desde la perspectiva mecánica, los resultados ponen de manifiesto que a partir de una cierta intensidad del impulso de frenado ( $Iv_{(CONTRAM-FIN)}$ ), el impulso de aceleración ( $Iv_{(PROPULSIÓN)}$ ) se mantiene en niveles relativamente altos (CMJ+S y DJ-AR). Sin embargo, cuando la intensidad supera ciertos valores (DJ-M), el impulso de



**Figura 3.** Relación polinomial de la distribución entre el impulso de frenado, expresado en porcentajes con respecto al impulso de aceleración ( $I_{v_{(CONTRAM.-FIN.)}}$  %) y el impulso de aceleración ( $I_{v_{(PROPULSIÓN)}}$ )

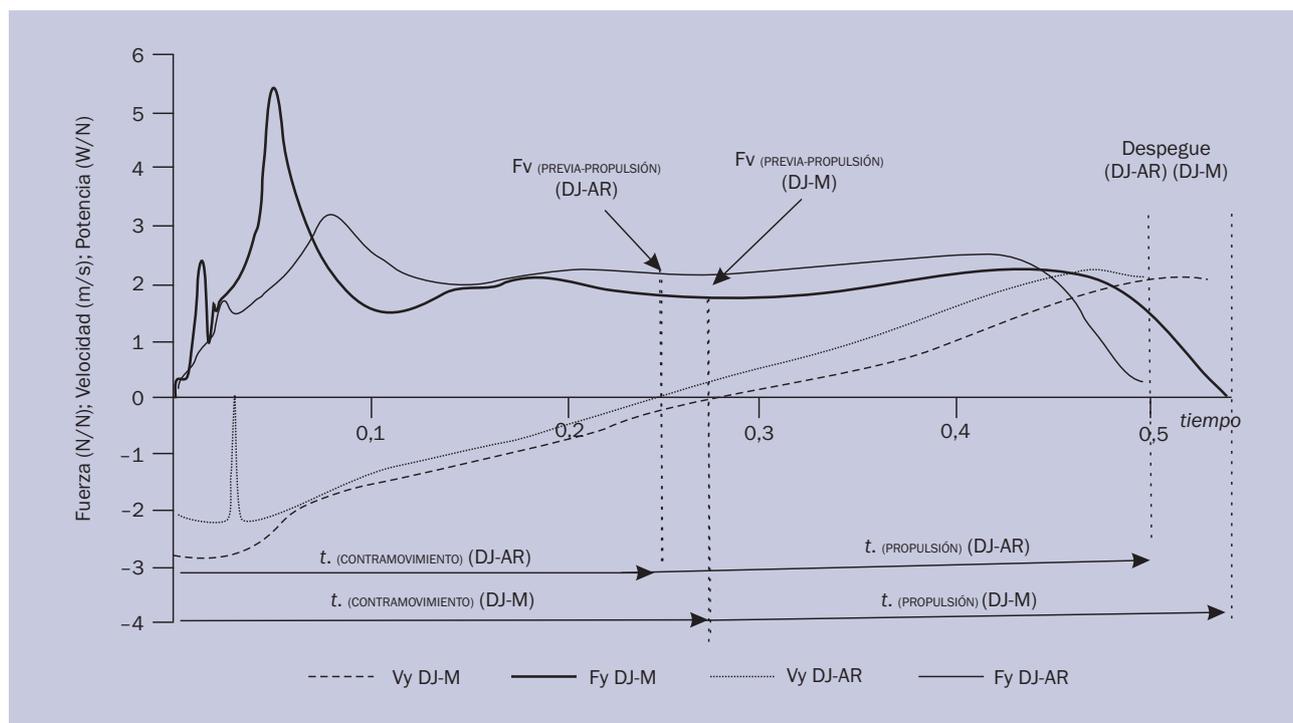
aceleración ( $I_{v_{(PROPULSIÓN)}}$ ) se reduce significativamente (ver *tabla 2*). Debemos recordar que en las situaciones CMJ+S y DJ-AR, los protocolos permitían que los participantes controlasen la intensidad del impulso de frenado para obtener el máximo impulso de aceleración, mientras que en la condición DJ-M, la altura de caída está condicionada por la máxima capacidad de salto que puede desarrollar cada participante. En cierto modo, también podríamos decir que el impulso de frenado estaría controlado, aunque en este caso, en función de la máxima capacidad individual de salto. Para comprobar la relación que tiene el impulso de frenado, con respecto al impulso de aceleración, en la *figura 3*, se presenta la relación polinomial cúbica que mejor se ajusta a la distribución entre el impulso de frenado, expresado en porcentajes con respecto al impulso de aceleración ( $I_{v_{(CONTRAM.-FIN.)}} \text{ \%} = (I_{v_{(CONTRAM.-FIN.)}} / I_{v_{(PROPULSIÓN)}}) * 100$ ) y el impulso de aceleración ( $I_{v_{(PROPULSIÓN)}}$ ), comprobándose que el impulso de aceleración tiende a reducirse cuando el impulso de frenado supera el 60 % del impulso de aceleración. Los datos también reafirman la existencia de un umbral de intensidad de contramovimiento, a partir del cual es posible obtener el máximo impulso de aceleración con independencia del porcentaje de intensidad del impulso de frenado, el cual se situaría entre el 30 % y el 60 % del impulso de aceleración (*fig. 3*).

Siguiendo con esta concepción mecánica, el beneficio del contramovimiento estaría basado en la

posibilidad de conseguir una fuerza inicial previa al impulso de aceleración, superior a la del propio cuerpo, lo que Hochmuth (1967) ha descrito como principio de fuerza inicial. Efectivamente, en todas las condiciones de salto, la fuerza previa a la propulsión ( $F_{v_{(PREVIA-PROPULSIÓN)}}$ ) supera como media, al menos en dos veces, el peso del cuerpo (ver *tabla 2*). Sin embargo, los valores máximos se consiguen cuando el salto previo se realiza con intensidad autocontrolada (DJ-AR), con respecto a las otras dos modalidades de salto. El hecho de que los saltos CMJ+S obtengan un impulso de aceleración ( $I_{v_{(PROPULSIÓN)}}$ ), similar al registrado en DJ-AR, partiendo de una fuerza previa significativamente inferior, podría tener su explicación en el tiempo de propulsión ( $t_{(PROPULSIÓN)}$ ), el cual es mayor para los saltos CMJ+S. Posiblemente ayudado por un mayor desplazamiento hacia abajo del CM durante la fase de contramovimiento ( $Y_{CM}$  mínima) y, consecuentemente, una mayor distancia de aceleración vertical del CM. Un aspecto que confirma las aportaciones de Walsh et al. (2004), cuando indican que el tiempo de batida es el factor que condiciona el rendimiento del salto, independientemente de la altura de caída. Cuando se comparan los saltos DJ-AR con los realizados después de un salto máximo (DJ-M), la fuerza media registrada antes de iniciar la fase propulsiva es inferior para DJ-M, mientras que el tiempo de la fase de propulsión es significativamente superior (ver *tabla 2*). Algo similar a lo expuesto cuando se comparaba CJ-AR con CMJ+S, aunque, este caso, todas las variables relacionadas con el rendimiento del salto son inferiores para DJ-M.

En la *figura 4* se presentan los registros de fuerza neta vertical en relación con el peso del participante ( $Fy$ ) y la velocidad vertical del CM ( $Vy$ ), en las condiciones de salto DJ-AR y DJ-M, para uno de los participantes como representante de los datos numéricos de tendencia presentados en la *tabla 2*. En esta gráfica, también se presentan los datos temporales de las fases de contramovimiento ( $t_{(CONTRAMOVIMIENTO)}$ ) y propulsión ( $t_{(PROPULSIÓN)}$ ).

El hecho de que el tiempo de la fase de contramovimiento sea superior para DJ-M, es la consecuencia de tener que frenar una mayor cantidad de movimiento, adquirido durante la caída ( $C = \int \text{masa} * dVy$ ). Así, cuando  $C$  supera ciertos valores por encima de la fuerza máxima individual, la cantidad de impulso vertical necesario para frenar dicha cantidad de movimiento se obtiene mediante un incremento excesivo del tiempo utilizado para el impulso de frenado, lo



**Figura 4.** Fuerza neta vertical ( $F_y$ ) y velocidad vertical del CM ( $V_y$ ), en las condiciones de salto DJ-AR y DJ-M, para uno de los participantes como representantes

que produce un mayor desplazamiento hacia abajo del CM que podría situar las articulaciones de las rodillas en una situación poco ventajosa para invertir el movimiento de forma fluida. Esta explicación estaría fundamentada en las aportaciones de Waller, Gersick y Holman (2013) al poner de manifiesto que, al final del contramovimiento, debe de existir una rápida contracción muscular que permita la propulsión vertical del CM. Para reafirmar esta teoría, el comportamiento de la fuerza vertical para las dos condiciones ( $F_y$  DJ-M y  $F_y$  DJ-AR), representado en la *figura 4*, nos permite comprobar cómo  $F_y$  DJ-M, comienza a descender a partir de 0,190 s de la recepción, mientras que el impulso de aceleración comienza en 0,270 s, lo que constituye un periodo de pérdida de 0,080 s antes de comenzar la fase propulsiva. Por el contrario,  $F_y$  DJ-AR, sólo alcanza un periodo de pérdida de 0,022 s, lo que provoca que la fuerza registrada antes de iniciar la fase propulsiva sea menor para DJ-M ( $F_{V(PREVIA-PROPULSIÓN)}$ ) y nos permite pensar que esta demora pueda ser un factor relacionado con la inversión fluida del movimiento, un aspecto que debería ser comprobado empíricamente en posteriores investigaciones.

## Conclusiones y aplicación práctica

Cuando se realizan saltos con alturas de caída superiores a  $0,39 \pm 0,05$  m, el pico de potencia durante la fase propulsiva ( $PP_{(PROPULSIÓN)}$ ), el impulso vertical de propulsión ( $I_{V(PROPULSIÓN)}$ ), y la altura de salto ( $Y_{CM}$  *vuelo*), se reducen de forma significativa, lo que nos permite afirmar que se reduce el rendimiento del salto. Sin embargo, el rendimiento del salto no varía cuando la altura de caída está autoregulada (comprendida entre 0 y  $0,14 \pm 0,06$  m). Consideramos que es necesario tener una cierta cautela al generalizar estos resultados a otras poblaciones con características físicas diferentes a las que se utilizan en esta investigación.

Generalizando los resultados en función de las características individuales de los participantes, el impulso de aceleración tiende a reducirse cuando el impulso de frenado supera el 60 % del impulso de aceleración. Los datos también reafirman la existencia de un umbral de intensidad de contramovimiento, a partir del cual es posible obtener el máximo impulso de aceleración con independencia del porcentaje de intensidad del impulso de frenado, el cual se situaría entre el 30 % y el 60 % del impulso de aceleración.

Cuando se utilizan alturas de caída superiores a 0,40 m o más, existe una falta de amortiguación en los primeros instantes de la recepción que podría suponer un mayor riesgo de lesiones. Posiblemente esa escasa amortiguación estaría motivada por una cierta inhibición neural debida al desarrollo de una fuerza excéntrica excesiva, por encima de la fuerza máxima excéntrica. Consideramos que este aspecto debería ser objeto de estudio en otras investigaciones con una orientación más específica.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Referencias

- Aragón-Vargas, L. F. (2000). Evaluation of four vertical jump tests: Methodology, reliability, validity and accuracy. *Measurement in Physical Education and Exercise Science*, 4(4), 215-228. doi:10.1207/S15327841MPEE0404\_2
- Bobbert, M. F., Huijting, P., & Van Ingen Schenau, G. J. (1987). Drop jump II. The influence of dropping height on the biomechanics of jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19(4), 339-346.
- Cavagna, G. A., Dusman, B., & Margaria, R. (1968). Positive work done by a previously stretched muscle. *Journal of Applied Physiology*, 24(1), 21-32.
- Dapena, J., & Chung, C. S. (1988). Vertical and radial motions of the body during the take-off phase of high jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 20(3), 290-302. doi:10.1249/00005768-198806000-00014
- Ebben, W. P., Blackard, D. O., & Jensen, R. L. (1999). Quantification of medicine ball vertical impact forces: Estimating effective training loads. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 13(3), 271-274.
- Felner, M. E., Bishop, E. J., & Pérez, C. M. (2004). Segmental and kinetic contributions in vertical jumps performed with and without an arm swing. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 75(3), 216-230. doi:10.1080/02701367.2004.10609155
- Granata, K. P., Wilson, S. E., & Padua, D. A. (2002). Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part I. Quantification in controlled measurements of knee joint dynamics. *Journal of Electromyographic & Kinesiology*, 12(2), 119-126. doi:10.1016/S1050-6411(02)00002-0
- Gutiérrez-Dávila, M., Gutiérrez Cruz, C., Garrido, J. M., Giles, F. J., & Rojas, F. J. (2012). Efecto de la restricción segmentaria en los test de salto vertical CMJ. *Archivos de Medicina del Deporte*, XXV(147), 527-535.
- Hara, M., Shibayama, A., Takeshita, D., & Fukashiro, S. (2006). The effect of arm swing on lower extremities in vertical jumping. *Journal of Biomechanics*, 39(13), 2503-2511. doi:10.1016/j.jbiomech.2005.07.030
- Hochmuth, G. (1967). *Biomechanik sportlicher bewegungen*. Berlin: Sportverlag.
- Jensen, R. L., & Ebben, W. P. (2007). Quantifying plyometric intensity via rate of force development, knee joint, and ground reaction forces. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 21(3), 763-767.
- Komi, P. V. (1984). Physiological and biomechanical correlates of muscle function: Effects of muscle structure and stretch-shortening cycle on force and speed. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 12, 81-121. doi:10.1249/00003677-198401000-00006
- Lees, A., & Fahmi, E. (1994). Optimal drop heights for plyometric training. *Ergonomics*, 37(1), 141-148. doi:10.1080/00140139408963632
- Lees, A., Vanrenterghem, J., & De Clercq, D. (2004). Understanding how an arm swing enhances performance in the vertical jump. *Journal of Biomechanics*, 37(12), 1929-1940. doi:10.1016/j.jbiomech.2004.02.021
- Leva, de, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanovs segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 29(9), 1223-1230.
- Moran, K. A., & Wallace, E. S. (2007). Eccentric loading and range of knee joint motion effects on performance enhancement in vertical jumping. *Human Movement Science*, 26(6), 824-840. doi:10.1016/j.humov.2007.05.001
- Peng, H.-T. (2011). Changes in Biomechanical properties during drop jumps of incremental height. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(9), 2510-2518. doi:10.1519/JSC.0b013e318201bcb3
- Schmidt R. A., & Lee, T. D. (2011). *Motor control and learning: A behavioral emphasis* (5.ª ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Sousa, F., Ishikawa, M., Vilas-Boas, J. P., & Komi, P. V. (2007). Intensity- and muscle-specific fascicle behavior during human drop jumps. *Journal of Applied Physiology*, 102(1), 382-389. doi:10.1152/jappphysiol.00274.2006
- Van Ingen Schenau, G. J., Bobbert, M. F., & Haan, A. (1997). Mechanics and energetics of the stretch-shortening cycle: A stimulating discussion. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(4), 484-496.
- Voigt, M., Simonsen, E. B., Dyhre-Poulsen, P., & Klausenf, K. (1995). Mechanical and muscular factors influencing the performance in maximal vertical jumping after different prestretch loads. *Journal of Biomechanics*, 28(3), 293-307. doi:10.1016/0021-9290(94)00062-9
- Wallace, B. J., Kernozek, T. W., Write, J. M., Kline, D. E., Wright, G. A. Peng, H., & Huang, C. (2010). Quantification of vertical ground reaction forces of popular bilateral plyometric exercises. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(1), 207-212. doi:10.1519/JSC.0b013e3181c3b841
- Waller, M., Gersick, M., & Holman, D. (2013). Varius jump training styles for improvement of vertical jump performance. *Strength and Conditioning Journal*, 35(1), 82-89. doi:10.1519/SSC.0b013e318276c36e
- Walsh, M., Arampatzis, A., Schade, F., & Bruggemann, G. P. (2004). The effect of drop jump starting height and contact time on power, work performed, and moment of force. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 18(3), 561-566.
- Winter, D. A. (1990). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement* (2.ª ed.). New York: Wiley Interscience.
- Wood, G. A., & Jennings, L. S. (1979). On the use of spline functions for data smoothing. *Journal of Biomechanics*, 12(6), 477-479. doi:10.1016/0021-9290(79)90033-2
- Zatsiorsky, V. M., & Seluyanov, N. V. (1983). The mass and inertial characteristics of the main segments of the human body. En H. Matsui & K. Kobayashi (Eds.), *Biomechanics VIII-B* (pp. 1152-1159). Champaign, IL: Human Kinetics.