

MÉTODO PARA DETERMINAR LA CONTRIBUCIÓN SEGMENTARIA EN LOS SALTOS. SU APLICACIÓN EN EL SALTO VERTICAL CON CONTRAMOVIMIENTO

Gutiérrez-Dávila, M.; Garrido, J. M.; Amaro, F. J.;
Ramos, M.; Rojas, F. J.

Departamento de Educación Física y Deportiva. Universidad de Granada

RESUMEN

El propósito de este estudio ha sido el desarrollo de un cálculo que permita cuantificar la contribución de los movimientos de los segmentos corporales al desplazamiento vertical del centro de gravedad (CG) del cuerpo y derivar el análisis de su secuencia temporal durante la realización de los saltos, utilizando para ello, fotogrametría a partir de imágenes de vídeo (2D y 3D) y cualquier modelo coordinado del cuerpo humano que permita el conocimiento de las masas y localizaciones de sus respectivos segmentos. El procedimiento utilizado permite su aplicación a las batidas desarrolladas para cualquier tipo de salto y en situación real de competición, aportando el registro individualizado y para cada instante. Para su evaluación se ha realizado una aplicación práctica para los saltos verticales con contramovimiento, utilizando para ello la fotogrametría 2D y un modelo simplificado de ocho segmentos. Los resultados permiten confirmar la idoneidad del sistema para evaluar la contribución segmentaria en los saltos verticales, poniendo de manifiesto, en su aplicación práctica, que la contribución media de los brazos ha supuesto el 9% del desplazamiento vertical del CG; el tronco más la cabeza, ha supuesto el 25%; los muslos, el 28%; las piernas, el 22% y los pies el 15%.

Palabras clave: biomecánica, salto vertical, dinámica, fotogrametría 2D.

ABSTRACT

The main aim of this study has been the development of a calculation that allows to measure the contribution of the corporal segments' movements to the vertical displacement of the center of gravity (CG) of the whole body and to derive the analysis of the temporary sequence during the execution of the jumps, using for it, the analysis of video images (2D and 3D) and any model of the human body known the masses and locations of the segments. The method allows his application to the take-off phase for any type of jump and in real situation of competition, showing the individualized data for every instant. A practical application for his evaluation has been realized for the countermovement vertical jumps, using 2d photogrammetry and a simplified model of five segments. The results allow to confirm the suitability of the method to evaluate the segmental contribution in the vertical jumps, showing in his practical application, that the median contribution of the arms were 9 % of the vertical displacement of the CG; the trunk and the head, 25 %; the thighs, 28 %; the legs, 22 % and the feet 15 %.

Key Words: biomechanics, vertical jump, kinetics, 2D photogrammetry.

Correspondencia:

Francisco Javier Rojas Ruiz
Facultad de Ciencias del Deporte.
Departamento de Educación Física. Universidad de Granada
Ctra. Alfacar s/n 18011-Granada, (España)
fjrojas@ugr.es

Fecha de recepción: 18/08/2012

Fecha de aceptación: 14/12/2012

INTRODUCCIÓN

El salto vertical ha constituido un objeto de estudio para numerosas investigaciones relacionadas con la biomecánica deportiva. En unas ocasiones con el propósito de estudiar la coordinación de deportista (Eloranta, 2003; Tomioka, Owings, and Grabiner, 2001) o el efecto positivo del contramovimiento (Arakawa et al., 2010; Asmusen y Bonde-Petersen, 1974; Bosco y Komi, 1979; Enoka, 1994; Harman, Rosentein y Frykman 1990). Sin embargo, quizás sea el estudio de la contribución de los segmentos a la altura del salto, el propósito que con más frecuencia se ha investigado y, muy especialmente, el efecto que tiene la contribución de los brazos al salto vertical (Feltner, Bishop y Pérez; 2004; Harman et al., 1990; Lees, Vanrenterghem y De Clerq, 2004; Miller, 1976; Payne, Slater y Telford, 1968; Shetty y Etnyre, 1989). La relevancia que tiene el análisis de la contribución segmentaria para entender los mecanismos que explican su participación en la mejora del salto, ha motivado que se desarrollen diferentes métodos para determinar su contribución.

En un análisis global de la participación de los segmentos al salto vertical, Luhtanen y Komi (1978) utilizaron una plataforma de fuerza y fotogrametría 2D, junto a los parámetros inerciales de los segmentos, para estudiar la contribución segmentaria a partir de movimientos parciales asociados al salto vertical sin contramovimiento, hallando que la acción de los brazos contribuye en un 10% a la velocidad de despegue, la extensión del tronco más la cabeza el 12%, la extensión de la rodilla el 56% y la flexión plantar del pie un 22%. Sin embargo, no se toma en consideración el efecto que podría tener el movimiento de unos segmentos con respecto a los demás.

Dapena (1987) definió la actividad de los brazos como la diferencia entre la velocidad vertical mínima y máxima del centro de masa (CM) de los tres segmentos que componen los miembros superiores (mano, antebrazo y brazo), con respecto al centro de gravedad (CG) del tronco, durante el tiempo de batida del salto de altura, hallándose valores comprendidos entre 0 y 11 m/s. Este cálculo, además de limitarse a determinar su contribución neta durante el periodo de batida, indica la actividad de los brazos sin precisar su contribución a la velocidad del CG de todo el cuerpo del saltador.

Ae y Shibukawa (1980) y Lees y Barton (1996) introdujeron el concepto de cantidad de movimiento vertical relativo de los segmentos corporales. Para ello dividieron la cantidad de movimiento de cada segmento ($m_S \cdot v_S$) en dos componentes: a) el transferido, considerado como el producto de la masa y la velocidad vertical del punto articular proximal de cada segmento ($m_S \cdot v_{PA}$) y b) el relativo, considerado como el producto de la masa y la velocidad vertical relativa del cm de cada segmento, con respecto al punto articular proximal ($m_S \cdot v_{S/PA}$). La cantidad de movimiento vertical

relativo de cada segmento, con respecto a la cantidad de movimiento total del cuerpo, permite establecer las contribuciones de cada segmento a la velocidad vertical de despegue del CG del saltador, la participación temporal de los segmentos, así como el impulso generado sobre la articulación proximal.

Aplicando este mismo cálculo a saltos verticales con contramovimiento, Lees y Barton (1996), hallaron una contribución de los brazos del 12.7% a la cantidad de movimiento total del cuerpo en el instante del despegue. Posteriormente, utilizando esta misma metodología, Lees, Rojas, Cepero, Soto y Gutiérrez (2000) analizaron la influencia de la acción de los brazos y pierna libre sobre el salto de altura de atletas de élite. Sus resultados, además de permitir la descripción de la coordinación entre los segmentos, determinaron una aportación del 7.1% de los brazos y pierna libre, con respecto a la cantidad de movimiento total del cuerpo en el instante del despegue.

Feltner, Frascetti y Crisp (1999), Lees, Vanrenterghem y De Clercq (2004 y 2006) y Hara, Shibayama, Takeshita y Fukashiro (2006) analizaron las contribuciones de los brazos en los saltos verticales mediante dinámica inversa. A partir de las posiciones del CM de los segmentos, sus velocidades y las fuerzas de reacción contra el suelo, pudieron determinar las fuerzas, los momentos de fuerzas, la potencia y el trabajo realizado sobre las articulaciones. Igualmente, determinaron la energía de los segmentos como la suma de su energía potencial y energías cinéticas de traslación y rotación. Estas investigaciones indican que la acción de los brazos incrementa el trabajo sobre las articulaciones de la cadera, rodilla y tobillo a causa del incremento de las fuerzas internas. Sobre el efecto de los brazos en el desplazamiento vertical del CG, estos trabajos indican que contribuyen significativamente a incrementar la altura de salida del CG y el tiempo de aplicación de fuerzas. A partir de esta metodología, Vanrenterghem, Lees y De Clercq (2008) han puesto de manifiesto que la inclinación hacia delante del tronco y su posterior extensión incrementa un 10% la altura del salto vertical, disminuye la potencia en la articulación de la cadera y la aumenta en la rodilla.

Aunque el uso de la metodología basada en la dinámica inversa, ha permitido avanzar en el conocimiento y la explicación causal sobre la contribución de los segmentos en los saltos verticales, la necesidad del registro de las fuerzas externas (plataformas de fuerza), crea serias dificultades de su uso para situaciones reales de competición (salto de altura, salto de longitud, o saltos realizados durante el desarrollo de actividades como baloncesto, voleibol o gimnasia, entre otros). Así, el propósito de este estudio ha sido el desarrollo de un cálculo que permita cuantificar la aportación de los movimientos de los segmentos corporales al desplazamiento del CG del cuerpo, durante las fases de impulso de aceleración de los saltos, utilizando para ello, la fotogrametría 2D y 3D, permitiendo su aplicación a las batidas desarrolladas para

cualquier tipo de salto y aportando el registro individualizado para cada instante durante el periodo de aceleración del CG.

MÉTODO

Material y modelo de sistema coordinado para el salto vertical

Se ha utilizado una cámara de vídeo, Casio EX-FH20 que registraba a 210 Hz el plano sagital de los saltos verticales con contramovimiento con una resolución de 640x480. Para simplificar el procedimiento, el salto vertical ha sido considerado como un movimiento simétrico que se desarrolla en el plano, lo que nos ha permitido utilizar un modelo coordinado simplificado de 8 segmentos, definidos por 12 marcadores situados en el cuerpo del saltador (Extremos anterior y posterior del pié; centros articulares del tobillo, rodilla, cadera, codo y muñeca; 3º metacarpiano de la mano; hueco supraesternal; ángulo del maxilar y vertex). La posición de los marcadores se estableció según el modelo y los parámetros inerciales propuestos por Zatsiorsky y Seluyanov (1985) y adaptados por De Leva (1996). En este modelo simplificado, la masa de los segmentos correspondientes a las extremidades, se ha considerado como la suma de los dos segmentos correspondientes. En la figura 1 se presenta el modelo simplificado del cuerpo humano utilizado para este estudio.

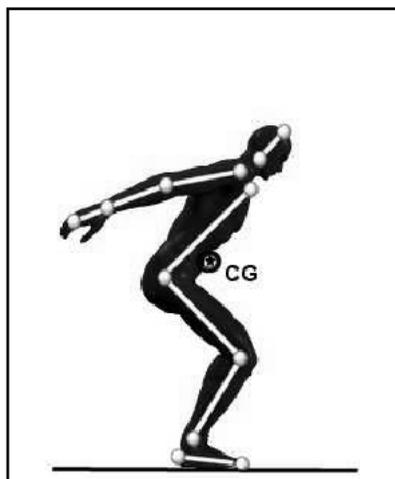


FIGURA 1: Sistema coordinado simplificado del cuerpo del saltador

Obtención de las coordenadas planas del modelo

El proceso de análisis comenzó con la digitalización manual de los marcadores situados en el sistema de referencia (Gutiérrez, Soto y Martínez, 1990). A continuación se digitalizaron de los marcadores que definían el modelo humano, utilizando

para ello las imágenes de vídeo a una frecuencia de 70 Hz. A partir de estos datos, junto a las posiciones reales conocidas de ocho marcadores asociados a un sistema de referencia consistente en un cubo de 2x2x0.5 m, permitió la obtención de las coordenadas planas reales de los marcadores que determinan el modelo humano propuesto. A continuación, las coordenadas planas de los 12 marcadores corporales, fueron suavizadas mediante un filtro digital de paso bajo, a 8 Hz, (Winter, 1990) e interpolados a 500 Hz, mediante splines de quinto grado (Wood y Jennings, 1979).

1. Desarrollo del modelo de determinación de la contribución segmentaria

El desarrollo para el cálculo de la contribución de los segmentos al desplazamiento vertical del CG del saltador, se ha basado en una de las propiedades del CG de un sistema coordinado de n segmentos (Gutiérrez-Dávila, 1998), donde la posición vertical del CG está directamente relacionada con la siguiente expresión (E-1):

$$Z_{(CG)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (m_i \cdot Z_{cm_i})}{\sum_{i=1}^{i=n} m_i} \quad \text{E-1}$$

donde $Z_{(CG)}$ es la posición vertical del CG del sistema; m_i es la masa de los segmentos que determinan el sistema y Z_{cm_i} es su posición vertical.

La contribución de los segmentos libres (brazos, antebrazos y manos) se ha simplificado determinando previamente la posición vertical del centro de masa (cm) de los tres segmentos, para cada posición consecutiva a intervalos de 0.002 s ($Z_{cm_{BRs}}$). A continuación, las sucesivas posiciones de $Z_{cm_{BRs}}$ se expresan con respecto a la posición vertical del marcador situado en el punto supraexternal del cuerpo (Z_{SUP}), siguiendo la expresión E-2.

$$Z_{cm_{BRs/SUP}} = (Z_{cm_{BRs}} - Z_{SUP}) \quad \text{E-2}$$

donde $Z_{cm_{BRs/SUP}}$ es la posición vertical del centro de masa (cm) de los brazos, con respecto al marcador situado en el supraexternal, $Z_{cm_{BRs}}$ es la coordenada vertical del cm de los brazos y Z_{SUP} es la posición vertical del marcador situado en el supraexternal, para cada instante.

El desplazamiento vertical de $Z_{cm_{BRs/SUP}}$, para cada intervalo de tiempo ($t=0.002$ s), se obtiene mediante la expresión E-3

$$\Delta Zcm_{BRs/SUP} = (Zcm_{BRs/SUP})_{n+1} - (Zcm_{BRs/SUP})_n \quad E-3$$

donde $\Delta Zcm_{BRs/SUP}$ es el desplazamiento vertical del cm de los brazos, con respecto al marcador situado en el supraexternal, para cada intervalo de tiempo.

Finalmente, la contribución de los brazos al desplazamiento vertical del CG del sistema, para cada intervalo de tiempo (C_{BRs}), se expresa mediante el producto de $\Delta Zcm_{BRs/SUP}$ y el porcentaje de masa que tienen los seis segmentos que constituyen los dos brazos, con respecto a la masa total del saltador (E-4). El hecho de dividir el resultado por la talla del sujeto, se hace para expresar el desplazamiento vertical con respecto a la talla del sujeto. Un aspecto que sólo será necesario en estudios donde se pretende comparar la contribución de los segmentos entre diferentes sujetos. En caso de ser necesario, es posible determinar por separado la contribución de cada uno de los brazos, considerando en este caso, sólo el porcentaje de las masas de los tres segmentos que los definen.

$$C_{BRs} = \frac{(\Delta Zcm_{BRs/SUP}) \cdot \%m_{BRs}}{talla} \quad E-4$$

donde C_{BRs} es la contribución de los brazos al desplazamiento vertical del CG del sistema, para cada intervalo de tiempo; $\Delta Zcm_{BRs/SUP}$, es el desplazamiento vertical del cm de los brazos con respecto al marcador del supraexternal y $\%m_{BRs}$ es el porcentaje de masa de los brazos con respecto a la masa total del sistema, expresado en % de 1.

Para determinar la contribución del tronco más la cabeza, se comienza calculando la posición vertical del cm de los brazos (manos, antebrazos y brazos) y el tronco más la cabeza, con respecto a la posición vertical del marcador situado en la cadera ($ZCAD$), para cada instante, siguiendo la expresión E-5.

$$Zcm_{BRs+TR+CA/CAD} = (Zcm_{BRs+TR+CA} - Z_{CAD}) \quad E-5$$

donde $Zcm_{BRs+TR+CA/CAD}$ es la posición vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza, con respecto al marcador situado en la cadera; $Zcm_{BRs+TR+CA}$ es la coordenada vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza y Z_{CAD} es la posición vertical del marcador situado en la cadera, para cada instante.

El desplazamiento vertical de $Zcm_{BRs+TR+CA/CAD}$, para cada intervalo de tiempo, se obtiene mediante la expresión E-6

$$\Delta Zcm_{BRs+TR+CA/CAD} = (Zcm_{BRs+TR+CA/CAD})_{n+1} - (Zcm_{BRs+TR+CA/CAD})_n \quad E-6$$

donde $\Delta Zcm_{BRs+TR+CA/CAD}$ es el desplazamiento vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza, con respecto al marcador de la cadera, para cada intervalo de tiempo ($t=0.002$ s).

La contribución del tronco más la cabeza, al desplazamiento vertical del CG del sistema (CTR+CA), se expresa en E-7:

$$C_{TR+CA} = \left[\frac{(\Delta Zcm_{BRs+TR+CA/CAD}) \cdot \%m_{BRs+TR+CA}}{talla} \right] - C_{BRs} \quad E-7$$

donde CTR+CA es la contribución del tronco más la cabeza al desplazamiento vertical del CG del sistema; $\Delta Zcm_{BRs+TR+CA/CAD}$, es el desplazamiento vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza, para cada intervalo de tiempo, con respecto al marcador de la cadera; $\%m_{BRs+TR+CA}$, es el porcentaje de masa de los brazos (manos, antebrazos y brazos), el tronco y la cabeza, con respecto a la masa total del sistema, expresado en % de 1 y C_{BRs} es la contribución de los brazos al desplazamiento vertical del CG del saltador, para cada intervalo de tiempo, determinado en E-4.

Siguiendo este mismo proceso, la contribución del muslo al desplazamiento vertical del CG, para cada intervalo de tiempo, se desarrolla a partir de las siguientes expresiones:

$$Zcm_{BRs+TR+CA+MU\$/ROD} = (Zcm_{BRs+TR+CA+MU\$/ROD} - Z_{ROD}) \quad E-8$$

$$\Delta Zcm_{BRs+TR+CA+MU\$/ROD} = (Zcm_{BRs+TR+CA+MU\$/ROD})_{n+1} - (Zcm_{BRs+TR+CA+MU\$/ROD})_n \quad E-9$$

$$C_{MU\$/} = \left[\frac{(\Delta Zcm_{BRs+TR+CA+MU\$/ROD}) \cdot \%m_{BRs+TR+CA+MU\$/}}{talla} \right] - (C_{BRs} + C_{TR+CA}) \quad E-10$$

donde $Zcm_{BRs+TR+CA+MU\$/ROD}$ es la posición vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza y muslos, con respecto al marcador situado en la rodilla; $Zcm_{BRs+TR+CA+MU\$/}$ es la coordenada vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza y muslos; Z_{ROD} es la posición vertical del marcador situado en la rodilla, $\Delta Zcm_{BRs+TR+CA+MU\$/ROD}$ es el desplazamiento vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza y muslos, para cada intervalo de tiempo, con respecto al marcador de la rodilla; $C_{MU\$/}$ es la contribución de los muslos al desplazamiento vertical del CG del sistema;

$\%m_{BRs+TR+CA+MU_s}$ es el porcentaje de masa de los brazos, el tronco más la cabeza y los muslos, con respecto a la masa total del sistema, expresado en % de 1; C_{BRs} y C_{TR+CA} corresponden a las contribuciones de los brazos y tronco más cabeza, respectivamente, al desplazamiento vertical del CG del saltador, para cada intervalo de tiempo, determinados en E-4 y E-7, respectivamente, para cada intervalo de tiempo.

Siguiendo este mismo procedimiento, la contribución de la pierna se desarrolla a partir de las siguientes expresiones:

$$Zcm_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs/TOB} = (Zcm_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs} - Z_{TOB}) \quad E-11$$

$$\Delta Zcm_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs/TOB} = (Zcm_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs/TOB})_{n+1} - (Zcm_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs/TOB})_n \quad E-12$$

$$C_{PNs} = \left[\frac{(\Delta Zcm_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs/TOB}) \cdot \%m_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs}}{talla} \right] - (C_{BRs} + C_{TR+CA} + C_{MU_s}) \quad E-13$$

donde $Zcm_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs/TOB}$ es la posición vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza, muslos y piernas, con respecto al marcador situado en el tobillo; $Zcm_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs}$ es la coordenada vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza, muslos y piernas; Z_{TOB} es la posición vertical del marcador situado en el tobillo; $\Delta Zcm_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs/TOB}$ es el desplazamiento vertical del cm de los brazos, tronco más cabeza, muslos y piernas, para cada intervalo de tiempo, con respecto al marcador del tobillo; C_{PNs} es la contribución de las piernas al desplazamiento vertical del CG del sistema; $\%m_{BRs+TR+CA+MU_s+PNs}$ es el porcentaje de masa de los brazos, el tronco más la cabeza, los muslos y las piernas, con respecto a la masa total del sistema, expresado en % de 1; C_{BRs} , C_{TR+CA} , C_{MU_s} corresponden a las contribuciones de los brazos, tronco más cabeza y muslos, respectivamente, al desplazamiento vertical del CG del saltador, para cada intervalo de tiempo, determinados en E-4, E-7 y E-10, respectivamente, para cada intervalo de tiempo.

Finalmente, la contribución de los pies, para cada intervalo de tiempo, se desarrolla a partir de las siguientes expresiones:

$$\Delta Z_{CG} = (Z_{CG})_{n+1} - (Z_{CG})_n \quad E-14$$

$$C_{PE} = \left(\frac{\Delta Z_{CG}}{talla} \right) - (C_{BRs} + C_{TR+CA} + C_{MU_s} + C_{PNs}) \quad E-15$$

donde ΔZ_{CG} es el desplazamiento vertical del CG del sistema, para cada intervalo de tiempo; Z_{CG} es la posición vertical del CG del cuerpo y C_{PIs} es la contribución de los pies al desplazamiento vertical del CG del sistema, para cada intervalo de tiempo.

Con el proceso de cálculo expuesto, es posible determinar la contribución segmentaria para cualquier periodo de tiempo, aunque nuestro interés reside en determinar la contribución de los segmentos durante la fase ascendente del CG. Siguiendo a Gutiérrez-Dávila, Campos y Navarro (2009), para determinar el inicio de la fase ascendente, se ha utilizado el instante en que se produce la mínima distancia radial (t_{OR}). Se trata de una distancia comprendida entre el CG y el punto medio del apoyo en el suelo. El final de la fase ascendente del CG se ha considerado como el tiempo medio del intervalo en que se produce el despegue del pie (t_{DE}).

Para determinar la contribución segmentaria durante la fase ascendente del CG, es necesario identificar el intervalo de tiempo donde la contribución de cada segmento se hace positiva (t_{C0}). Este instante no tiene por qué coincidir con el inicio de la fase ascendente (t_{OR}), por el contrario, unos segmentos iniciarán su contribución positiva antes de t_{OR} y otros la iniciarán más tarde, aunque el sumatorio de la contribución de todos los segmentos será cero para el instante t_{OR} . Así, para determinar la contribución de los segmentos durante la fase ascendente del CG, se desarrollan en las siguientes expresiones:

$$C_{(PO)BRs} = \sum_{i=t_{C0}}^{i=t_{DE}} (C_{BRs})_i \quad \text{y} \quad C_{(NE)BRs} = \sum_{i=t_{C0}}^{i=t_{DE}} (C_{BRs})_{i^*} \quad \text{cuando } t_{C0} > t_{OR} \quad \text{E-16}$$

$$C_{(PO)TR+CA} = \sum_{i=t_{C0}}^{i=t_{DE}} (C_{TR+CA})_i \quad \text{y} \quad C_{(NE)TR+CA} = \sum_{i=t_{C0}}^{i=t_{DE}} (C_{TR+CA})_{i^*} \quad \text{cuando } t_{C0} > t_{OR} \quad \text{E-17}$$

$$C_{(PO)MUs} = \sum_{i=t_{C0}}^{i=t_{DE}} (C_{MUs})_i \quad \text{y} \quad C_{(NE)MUs} = \sum_{i=t_{C0}}^{i=t_{DE}} (C_{MUs})_{i^*} \quad \text{cuando } t_{C0} > t_{OR} \quad \text{E-18}$$

$$C_{(PO)PNs} = \sum_{i=t_{C0}}^{i=t_{DE}} (C_{PNs})_i \quad \text{y} \quad C_{(NE)PNs} = \sum_{i=t_{C0}}^{i=t_{DE}} (C_{PNs})_{i^*} \quad \text{cuando } t_{C0} > t_{OR} \quad \text{E-19}$$

$$C_{(NE)PIs} = \sum_{i=t_{C0}}^{i=t_{DE}} (C_{PIs})_i \quad \text{E-20}$$

donde $C_{(PO)BRs}$, $C_{(PO)TR+CA}$, $C_{(PO)MUs}$, $C_{(PO)PNs}$, $C_{(PO)PIs}$, corresponden a las contribuciones de los cinco segmentos desde el instante que inicia la contribución positiva

de cada segmento (t_{CO}) hasta el despegue (t_{DE}); $C_{(NE)BRs}$, $C_{(NE)TR+CA}$, $C_{(NE)MUs}$, $C_{(NE)PNs}$, $C_{(NE)PIs}$, corresponden a las contribuciones de los cinco segmentos desde t_{CO} hasta el intervalo donde se produce la mínima distancia radial (t_{OR}), siempre que t_{CO} se produzca después de t_{OR} . C_{BRs} , C_{TR+CA} , C_{MUs} , C_{PNs} , C_{PIs} , es la contribución de los correspondientes segmentos para intervalos sucesivos.

Según se ha expuesto, con el propósito de simplificar el desarrollo y exposición del cálculo, en este trabajo se ha utilizado un modelo simplificado 2D para el salto vertical con contramovimiento, aunque puede generalizarse a otros modelos más complejos y 3D. Así, este proceso de cálculo puede ser adaptado fácilmente para sistemas más complejos donde la contribución de las extremidades sea estudiada por separado. Igualmente, es posible adaptar el cálculo a los saltos realizados con un solo apoyo, considerando a la pierna libre como un conjunto de tres segmentos que gira a través del marcador situado en la cadera o para el análisis de los desplazamientos horizontales, sustituyendo, en este caso, la componente vertical por la horizontal. Finalmente, debemos indicar que es posible sustituir la contribución de los segmentos al desplazamiento del CG del sistema, por la contribución a la velocidad del CG. En este caso, sólo es necesario obtener la velocidad media dividiendo el valor del desplazamiento vertical de cada segmento por el intervalo de tiempo utilizado (para este estudio $t=0.002$ s).

2. Aplicación Práctica del Sistema

Participantes

Han participado 3 mujeres y 27 hombres, estudiantes de Ciencias del Deporte (talla= 1.79 ± 0.06 m; masa= 75.7 ± 8.3 Kg), utilizando para su selección el criterio de haber participado en actividades deportivas donde el salto vertical constituye una habilidad básica. A todos ellos se les informó y solicitó su consentimiento para participar en este estudio siguiendo las directrices de la Comisión Ética de la Universidad.

Procedimiento

Después de un calentamiento previo personalizado, los participantes realizaron una sesión de cinco saltos máximos con contramovimiento partiendo de una posición erguida y los brazos extendidos a lo largo del cuerpo. Tras la filmación de los cinco saltos a una frecuencia de 210 Hz, se determinó el desplazamiento vertical del CG durante el vuelo para cada salto ($S_{CM(Z)}$), utilizando para ello el tiempo de vuelo (t), según la siguiente expresión: $S_{CM(Z)}=gt^2/8$. El tiempo de vuelo se consideró como el periodo comprendido entre el despegue y la recepción. Para su determinación se ha considerado el tiempo medio del intervalo donde se producía el despegue y la recep-

ción, respectivamente (0.00476/2 s). Para su posterior análisis, se seleccionó el salto cuyo $S_{CM(Z)}$ correspondía al valor mediano de los cinco saltos. La velocidad vertical del CG ($v_{CM(Z)}$) se determinó mediante la derivada de la función definida por la posición vertical del CG, con respecto al tiempo, utilizando para ello splines de quinto orden.

Análisis a través de las fases del salto vertical con contramovimiento

Para el análisis del salto vertical con contramovimiento, se ha utilizado la metodología propuesta por Feltner, Bishop y Perez, (2004). Así, se han definido tres fases: **a)** Contramovimiento, que comprende desde el inicio del movimiento hasta que se alcanza la mínima distancia radial (t_{OR}). Debido a las dificultad para localizar el instante de inicio, se ha considerado sólo una fase de contramovimiento final, que comienza con el instante en que el CG alcanza la mínima velocidad vertical, **b)** Fase de propulsión, que comprende un periodo temporal entre t_{OR} y el instante en que la velocidad vertical del CM alcanza su máximo valor (t_{MV}) y **c)** Fase previa al despegue, comprendida entre t_{MV} y el instante de despegue (t_{DE}). Para un análisis detallado, la fase de propulsión, se ha dividido en tres periodos temporales iguales, **b1**: Periodo de propulsión inicial, comprendido entre t_{OR} y t_1 ; **b2**: Periodo de propulsión medio, comprendido entre t_1 y t_2 y **b3**: Periodo de propulsión final, comprendido entre t_2 y t_{MV} , donde $t_1 = t_{OR} + 1/3(t_{MV} - t_{OR})$ y $t_2 = t_{OR} + 2/3(t_{MV} - t_{OR})$. En la figura 2 se presentan las contribuciones de los cinco segmentos, para uno de los sujetos, así como los instantes que determinan las fases descritas.

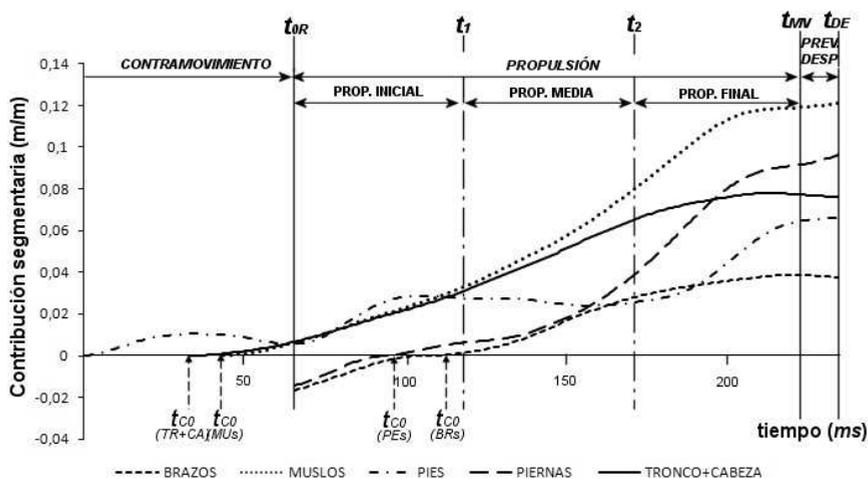


FIGURA 2: Representación gráfica de las fases que determinan el salto vertical con contramovimiento y representación gráfica de las contribuciones positivas de los cinco segmentos del modelo, junto a los eventos que inician la contribución.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla 1 se presenta la estadística descriptiva de los factores generales que hemos considerado relevantes para este estudio, donde $v_{CM(Z)-t_{MV}}$ es la máxima velocidad vertical del CG; $v_{CM(Z)-t_{DE}}$, es la velocidad vertical en el despegue; $S_{CM(Z)-DESP.-VERT.}$, es el desplazamiento vertical del CG desde la mínima distancia radial (t_{0R}) al despegue (t_{DE}), expresado en valores reales y normalizado con respecto a la talla de los participantes ($S_{CM(Z)-DESP.-VERT.}$ %); $S_{CM(Z)-VUELO}$ es el desplazamiento vertical del CG durante la fase de vuelo; $t_{CONT.-FINAL}$ es el tiempo de la fase de contramovimiento final; $t_{PROPULSION}$ es el tiempo de la fase de propulsión y $t_{PREV.-DESPEGUE}$ es el tiempo de la fase previa al despegue.

TABLA 1
Estadística de tendencia central de los factores más significativos del salto vertical con contramovimiento

Variables	Registros
Máxima velocidad vertical del CG, $v_{CM(Z)-t_{MV}}$ (ms^{-1})	2.83 ± 0.26
Velocidad vertical del CG en el despegue, $v_{CM(Z)-t_{DE}}$ (ms^{-1})	2.71 ± 0.25
Desplazamiento vertical del CG desde mínima distancia radial al despegue, $S_{CM(Z)-DESP.-VERT.}$ (m)	0.578 ± 0.072
Desplazamiento vertical del CG desde mínima distancia radial al despegue %, $S_{CM(Z)-DESP.-VERT.}$ % (m/m)	0.394 ± 0.041
Desplazamiento vertical del CG en la fase de vuelo, $S_{CM(Z)-VUELO}$ (m)	0.385 ± 0.07
Tiempo de la fase de contramovimiento final, $t_{CONT.-FINAL}$ (s)	0.175 ± 0.024
Tiempo de la fase de propulsión, $t_{PROPULSION}$ (s)	0.291 ± 0.030
Tiempo de la fase previa al despegue, $t_{PREV.-DESPEGUE}$ (s)	0.014 ± 0.000

De los datos expuestos se puede observar una variabilidad relativamente alta, aunque, aplicando el coeficiente de correlación intraclase a la variable $S_{CM(Z)-VUELO}$ para los cinco ensayos registrados a todos los participantes, se ha obtenido un valor de 0.901 ($p < 0.001$), lo que nos permite explicar que las diferencias encontradas han sido debidas a las diferencias entre los participantes y, especialmente, considerando que los sujetos analizados eran especialistas en diferentes deportes donde el salto vertical constituía una habilidad básica (baloncesto, fútbol, voleibol, balonmano, etc).

A pesar del modelo simplificado de segmentos utilizado en este estudio, los resultados son coincidentes a los aportados por Luhtanen y Komi (1978); Gutiérrez-Dávila, Garrido, Gutiérrez-Cruz y Giles (2011) y Lees et al., (2004), para los saltos verticales con contramovimiento, donde se han utilizado plataformas de fuerza. Este hecho nos permite considerar la idoneidad del modelo utilizado para los saltos verticales. En este sentido, la velocidad vertical media en el despegue ($v_{CM(Z)-t_{DE}}$) se ha reducido un 4.2% con respecto a la máxima velocidad alcanzada antes del despegue

($v_{CM(Z)}-t_{MV}$), lo que coincide con los aportados por Feltner et al., (2004) y Gutiérrez-Dávila et al. (2011).

En la tabla 2 se presentan las contribuciones acumuladas de los miembros superiores (C_{BRs}), el tronco más la cabeza (C_{TR+CA}), los muslos (C_{MU_s}), las piernas (C_{PNs}) y los pies (C_{PIs}) para el instante en que se produce la mínima distancia radial (t_{OR}), el final del periodo de propulsión inicial (t_1), el final de propulsión medio (t_2), máxima velocidad vertical del CG (t_{MV}) y el despegue (t_{DE}). Como se ha expuesto en el desarrollo del método, con el propósito de poder comparar los datos entre los sujetos, éstos se han expresado normalizados con respecto a la talla de los participantes (m de desplazamiento/ m de talla). A partir de los valores sobre la contribución segmentara acumulados en el instante del despegue, la contribución media de los brazos ha supuesto el 9% del desplazamiento vertical del CG; el tronco más la cabeza, ha supuesto el 25%; los muslos, el 28%; las piernas, el 22% y los pies el 15%.

TABLA 2
Contribuciones acumuladas de los segmentos para los instantes que definen las fases del desplazamiento vertical del CG

Segmento	Tiempo de registro acumulado				
	t_{OR}	t_1	t_2	t_{MV}	t_{DE}
C_{BRs} (m/m)	-0.019 ± 0.007	-0.002 ± 0.006	0.015 ± 0.006	0.032 ± 0.005	0.034 ± 0.005
C_{TR+CA} (m/m)	0.006 ± 0.005	0.031 ± 0.012	0.058 ± 0.018	0.076 ± 0.019	0.078 ± 0.020
C_{MU_s} (m/m)	0.005 ± 0.004	0.020 ± 0.008	0.049 ± 0.012	0.091 ± 0.020	0.091 ± 0.022
C_{PNs} (m/m)	-0.008 ± 0,007	0.004 ± 0.007	0.014 ± 0.008	0.057 ± 0.015	0.069 ± 0.013
C_{PIs} (m/m)	0.002 ± 0,003	0.001 ± 0.006	0.009 ± 0.007	0.031 ± 0.011	0.052 ± 0.011

Cuando se inicia el desplazamiento vertical del CG (t_{OR}), el tronco más la cabeza y los muslos ya mantienen contribuciones positivas, por el contrario, las contribuciones medias de los brazos y las piernas son negativas. Durante el periodo inicial de la fase de propulsión, el tronco más la cabeza y los muslos siguen contribuyendo al desplazamiento vertical del CG, con un incremento medio de 0.025 y 0.015 m/m, respectivamente, incrementándose esta tendencia durante el periodo medio de la fase de propulsión en 0.027 m/m y 0.029 m/m, respectivamente, sumándose a esta contribución los brazos y las piernas, con un incremento de 0.013 y 0.01 m/m, respectivamente. Durante el periodo final de la fase de propulsión, los brazos y el tronco más la cabeza, mantienen una cierta contribución positiva, aunque ésta se reduce a 0.017 m/m y 0.018 m/m, respectivamente. Por el contrario, los muslos, las piernas y los pies tienden a incrementar su contribución en 0.042 m/m, 0.043 m/m y 0.022 m/m, respectivamente. Finalmente, durante la fase previa al despegue sólo mantiene una cierta contribución positiva las piernas (0.012 m/m) y los pies (0.021 m/m). En esta fase,

la fuerza aplicada estaría por debajo del peso del cuerpo, lo que hace que la velocidad tienda a reducirse.

Debido a las diferentes metodologías y las magnitudes utilizadas en otras investigaciones para el cálculo de la contribución segmentaria en los saltos verticales, son escasos los trabajos que nos permitan comparar los datos registrados en este estudio para la contribución de todos los segmentos. Sin embargo, son numerosos los trabajos que señalan una contribución entre el 6% y 10% de los brazos a la velocidad vertical del CG en el despegue (Luhtanen y Komi, 1979, Shetty y Etnyre (1989); Harman et al. 1990). Unos datos que son coincidentes con los aportados en este estudio (9% del desplazamiento vertical del CG)

CONCLUSIONES

El proceso de cálculo expuesto permite determinar la contribución segmentaria durante el desplazamiento del CG en los saltos con doble apoyo, pudiéndose generalizar a las salidas y los movimientos gimnásticos, entre otros, utilizando para ello la fotogrametría 2D o 3D, por lo que constituye un cálculo válido para situaciones reales de competición. Igualmente, el proceso de cálculo expuesto, puede ser adaptado a los saltos realizados con un solo apoyo, considerando a la pierna libre como un conjunto de tres segmentos que gira a través del marcador situado en la cadera, lo que permite determinar su contribución al desplazamiento.

La aplicación práctica ha permitido cuantificar la contribución de los segmentos y su secuencia temporal durante el desplazamiento vertical del CG en los saltos verticales con contramovimiento. Consideramos que, a partir de los datos expuestos, sería posible inferir la participación muscular, aunque ésta sería una perspectiva de futuro que requiere el uso de técnicas electromiográficas para contractar empíricamente los datos y confirmar su fiabilidad.

Según los resultados expuestos, la contribución media de los brazos ha supuesto el 9% del desplazamiento vertical del CM; el tronco más la cabeza, ha supuesto el 25%; los muslos, el 28%; las piernas, el 22% y los pies el 15%. La secuencia temporal ha comenzado con la contribución del tronco y los muslos durante la fase de inicial de propulsión, a las que suman los brazos y las piernas durante la fase media de propulsión. A continuación, durante la fase final de propulsión, el tronco más la cabeza y los brazos tienden a reducir su contribución, mientras que los muslos, las piernas y los pies tienden a incrementarla. Finalmente, durante la fase previa al despegue sólo mantiene una cierta contribución positiva las piernas y, especialmente, los pies (0.021 m/m).

REFERENCIAS

- Ae, M. y Shibukawa, K. (1980). A biomechanical method for the analysis of the contribution of the body segments with an example of vertical jump take-off. *Japanese Journal of Physical Education*, 25, 233-243.
- Arakawa, H., Nagano, A., Yoshioka, S. y Fukashiro, S. (2010). Interaction between elastic energy utilization and active state development within the work enhancing mechanism during countermovement. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20, 340-347.
- Asmusen, E. y Bonde-Petersen, F. (1974). Apparent efficiency and storage of elastic energy in human muscles during exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*, 92, 537-545.
- Bosco, C. y Komi, P.V. (1979). Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching. *Acta Physiologica Scandinavica*, 106, 467-472.
- Dapena, J. (1987). *Basic and applied research in the biomechanics of high jumping*, en B. Van Gheluwe y J. Atha (eds), *Current Research in Sports Biomechanics* (Basle:Karger).
- De Leva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanovs segment inertia parameters. *Journal of Biomechanics*, 29, (9), 1223-1230.
- Eloranta, V. (2003). Influence of sports background on leg muscle coordination in vertical jumps. *Electromyography and Clinical Neurophysiology*, 43, 141-156.
- Enoka, R.M. (1994). *Neuromechanical basic of kinesiology*, (2nd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Feltner, M.E., Frascetti, D.J., y Crisp, R.J. (1999). Upper extremity augmentation of lower extremity kinetics during countermovement vertical jumps. *Journal of Sports Sciences*, 17, 449-466.
- Feltner, M.E., Bishop, E.J. y Perez, 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.
- Gutiérrez, M., Soto, V.M. y Martínez, M. (1990) *Sistema de análisis computerizado para el movimiento humano*. Unisport. Junta de Andalucía.
- Gutiérrez-Dávila, M. Garrido, J.M.; Gutiérrez-Cruz, C. y Giles, J. (2011). Análisis de la contribución segmentaria en los saltos verticales con contramovimiento y su efecto debido a la restricción propuesta en el test de Bosco CMJ. *Motricidad. European Journal of Human Movement*, 27, 59-74.
- Gutiérrez-Dávila, M. (1998). *Biomecánica deportiva*, Síntesis, Madrid, pp 211-214.
- Gutiérrez-Dávila, M., Campos, J. y Navarro, E. (2009). A comparison of two landing styles in a two-foot vertical fump. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(1), 325-331.
- Hara, M., Shibayama, A. Takeshita, D. y Fukashiro, S. (2006). The effect of arm swing on lower extremities in vertical jumping. *Journal of Biomechanics*, 39, 2503-2511.
- Harman, E.A., Rosenstein, M.T., Frykman, P.N., y Rosenstein, R.M., (1990). The effects of arms and countermovement on vertical jumping. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22, 825-833.
- Lees, A. y Barton, G. (1996). The interpretation of relative momentum data to assess the contribution of the free limbs to the generation of vertical velocity in sports activities. *Journal of Sports Sciences*, 14, 503-511.

- Lees, A., Rojas, J., Cepero, M., Soto, V. y Gutiérrez, M. (2000). How the free limbs are used by elite high jumpers in generating vertical velocity. *Ergonomics*, 43, 10, 1622-1636.
- Lees, A., Vanrenterghem, J. y De Clercq, D. (2004). Understanding how an arm swing enhances performance in the vertical jump. *Journal of Biomechanics*, 37, 1929-1940
- Lees, A., Vanrenterghem, J. y De Clercq, D. (2006). The energetics and benefit of an arm swing in submaximal and maximal vertical jump performance. *Journal of Sports Sciences*, 24 (1), 51-57.
- Luhtanen, P. y Komi, R.V. (1978). Segmental contribution to forces in vertical jump. *European Journal of Applied Physiology*, 38, 181-188.
- Miller, D.I. (1976). *A biomechanical analysis of the contribution of the trunk to standing vertical jump take-offs*. In Brockhoff, J. (Ed.), *Physical education, sport and the sciences*. Eugene, OR: Microform Publications, pp. 357-374
- Payne, A.H., Slater, W.J. y Telford, T. (1968). Use of force platform in the study of athletic activities. *Ergonomics*, 11, 123-146.
- Shetty, A.B., y Etnyre, B.R. (1989). Contribution of arm movement to the force components of maximal vertical jump. *The Journal Orthopaedic and Sports Physical Therapy*, 11, 198-201.
- Tomioka, M., Owings, T.M., y Grabiner, M.D. (2001). Lower extremity strength and coordination are independent contributors to maximum vertical jump height. *Journal of Applied Biomechanics*, 17, 181-187.
- Vanrenterghem, J., Lees, A., y De Clercq, D. (2008). Effect of forward trunk inclination on joint power output in vertical jumping. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(3), 708-714.
- Zatsiorsky, V.M. y Seluyanov, N.V. (1983). *The mass and inertial characteristics of the main segments of the human body*. In: *Biomechanics VIII-B*. Matsui, H. y K. Kobayashi (Eds) Champaign, I.L: Human Kinetics, 1152-1159.
- Winter, D.A. (1990). *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. (2.^a ed.) New York: Wiley Interscience., pp. 36-41.
- Wood, G.A. y Jennings, L.S. (1979). On the use of spline functions for data smoothing. *Journal of Biomechanics*, 12, 477-479.