

## Diferencias cinemáticas en saltadoras de altura nacionales de diferente categoría de edad

### Variability of kinematic parameters Spanish female high jumpers of different age groups

Bermejo Frutos, J.<sup>1</sup>, Palao Andrés, J.M.<sup>2</sup>, López Elvira, J.L.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM). España.

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte. Universidad de Murcia. España.

<sup>3</sup> Centro de Investigación del Deporte. Universidad Miguel Hernández de Elche. España.

Dirección de contacto

Javier Bermejo Frutos: javier\_bermejo\_frutos@hotmail.com

Fecha de recepción: 14 de Noviembre de 2012

Fecha de aceptación: 21 de Diciembre de 2012

#### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue fijar las variables biomecánicas que más correlacionan con el rendimiento del salto de altura en función del grupo de edad. Se analizó el mejor salto de las finalistas en el campeonato nacional: 11 saltadoras de categoría cadete, nueve de categoría junior, y 12 de categoría senior. Se calcularon 25 variables de cada salto (fases de ante-salto, batida, y paso del listón). La técnica utilizada para analizar el salto fue la fotogrametría 3D empleando tres cámaras de vídeo (50 Hz). Se realizó un análisis descriptivo e inferencial (correlación lineal de Spearman). Las variables cinemáticas que correlacionan con el rendimiento son diferentes en cada grupo de edad, salvo la altura del CM sobre el listón. Los resultados parecen indicar que la forma de evaluar la técnica y los aspectos clave a considerar no son aplicables por igual a todas las categorías de edad.

Palabras clave: Biomecánica, rendimiento, técnica, edad.

#### ABSTRACT

The purpose of this study was to establish the biomechanics variable of the high jump that are most highly correlated with performance in relation to age group. The best jump of 11 U-15 jumpers, nine U-18 jumpers, and 12 senior jumpers from their respective age group Spanish National Indoor Championship was recorded and analyzed. Twenty-five biomechanical variables were analyzed (pre-jump, take-off, and clearing the bar). The technique used to analyse the jumps as the 3D photogrammetric, using three video cameras (50HZ). A descriptive and inferential analysis of the data was done (Spearman correlation). The kinematic variables that correlate with performance are different for the different age groups, except the center of mass height on the bar. The results show that the evaluation and the key aspects of the technique should not be the same for the different age groups.

Key words: biomechanics, performance, technique, age.

## INTRODUCCIÓN

En salto de altura, actualmente, el modelo aceptado como referencia es el estilo fosbury flop. Este modelo técnico ha sido establecido a partir del análisis de los mejores saltadores de altura y las aplicaciones técnicas de los principios biomecánicos. No obstante, este modelo técnico teórico de rendimiento no es fijo. La eficacia técnica se optimiza cuando el modelo técnico se adapta/adequa a las propias características físicas y antropométricas del deportista (Dapena, McDonald, & Cappaert, 1990). A esta adaptación del modelo de referencia se la conoce como modelo técnico individual de rendimiento (Ozolín, 1988).

La mayoría de estudios biomecánicos se basan en el análisis de estos modelos técnicos individuales en competición oficial. Se define como la mejor alternativa para garantizar la validez de los datos obtenidos (Schwameder, 2011). En este sentido, se pueden encontrar estudios que analizan el mejor salto de varias atletas (Brüggemann & Loch, 1992; Conrad & Ritzdorf, 1986; Dapena, 1993; Dapena et al., 1990; Xu & Liu, 2005), estudios que analizan varias ejecuciones de una saltadora de rendimiento (Blažević, Antekolović, & Mejovšek, 2006; Ritzdorf, Conrad, & Loch, 1989), o varios saltos de varias saltadoras (Challis & Yeadon, 1992).

Uno de los mayores problemas en relación a la aplicabilidad de estos estudios es como trasladar los datos cuantitativos de los análisis biomecánicos a datos cualitativos (aspectos claves) (Andersen & Hovgaard, 2006; Knudson & Morrison, 2002), de forma que puedan ser empleados por los entrenadores para guiar, observar, y evaluar a los atletas, así como para focalizar su entrenamiento (Salo, 2002; Salo, Grimshaw, & Viitasalo, 1999).

Actualmente existe una ausencia de valores de referencia para categorías de formación con características antropométricas y físicas diferentes. La mayoría de estudios que analizan la relación de las variables cinemáticas de eficacia técnica con el rendimiento se han realizado en categoría masculina, centrándose en los saltadores pertenecientes al grupo de edad senior. Son escasos los estudios que focalizan su estudio en saltadores de categorías de edad inferior. Entre la bibliografía consultada destaca el estudio de Conrad y Ritzdorf (1986), que analiza a los finalistas en el Campeonato del Mundo junior.

El objetivo de este estudio fue determinar la variación y correlación de los parámetros cinemáticos de eficacia técnica para el salto de altura en función del proceso de formación deportiva en saltadoras de élite Españolas pertenecientes a tres grupos de edad diferente (13-15 años, 17-18 y más de 18 años).

## MATERIAL Y MÉTODO

### Participantes

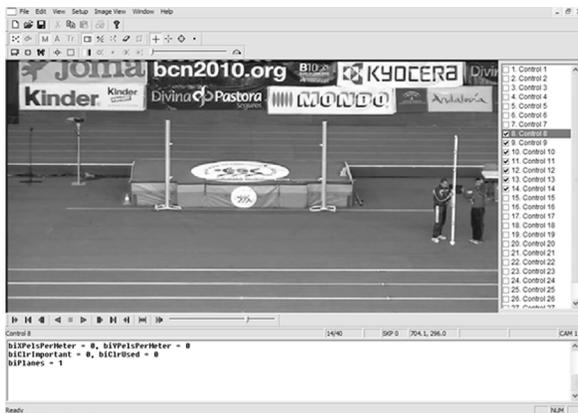
Se analizaron treinta y dos saltos de altura ejecutados durante la final del Campeonato de España en pista cubierta (temporada 2009). Estos saltos fueron el mejor salto de cada atleta en el campeonato (máxima elevación del listón) y pertenecían a 11 atletas de categoría cadete (edad:  $13.72 \pm 0.46$  años; estatura:  $1.63 \pm 0.06$  m; rendimiento:  $1.55 \pm 0.03$  m), nueve de categoría junior (edad:  $17.88 \pm 0.60$  años; estatura:  $1.67 \pm 0.07$  m; rendimiento:  $1.59 \pm 0.05$  m), y 12 de categoría senior (edad:  $22.50 \pm 5.82$  años; estatura:  $1.69 \pm 0.10$  m; rendimiento:  $1.73 \pm 0.08$  m).

### Procedimiento

Los saltos fueron filmados con tres cámaras estáticas sobre sus respectivos trípodes (dos cámaras mini dv Sony Handycam DCR-SR30E ubicadas lateralmente y una cámara digital de disco duro JVC Everio CU-VC3U ubicada en una posición frontal a la colchoneta). Esta ubicación formaba un ángulo entre los ejes ópticos de las cámaras de  $90^\circ$ , lo que representa una situación geométrica adecuada para la determinación precisa de las coordenadas 3D utilizando el algoritmo de Transformación Lineal Directa (Soto, 1995). Las cámaras grababan a 50 fotogramas por segundo y fueron configuradas de forma manual con un tiempo de obturación de la lente de  $1/1000$  s, tomando como referencia el estudio en condiciones indoor para la prueba de salto de altura llevado a cabo por Van Gheluwe, Roosen y Desloovere (2003). La frecuencia de registro de 50 Hz ha sido utilizada en estudios previos que analizan el salto de altura utilizando la metodología denominada fotogrametría 3D (Brüggemann & Loch, 1992; Challis & Yeadon, 1992; Dapena, 1996; Dapena, 1997; Dapena et al., 1990; Han & Li, 2000; Isolehto, Virmavirta, Kyröläinen, & Komi, 2007; Nolan & Prittiti, 2008; Tan & Yeadon, 2005), mostrándose suficiente para la determinación de las coordenadas del deportista y el subsecuente cálculo de parámetros cinemáticos espacio-temporales. Se utilizó sincronización interna a través de software para la correspondencia de los fotogramas en todas las cámaras. Para esta sincronización temporal se utilizaron varios eventos (contacto antepenúltimo apoyo, contacto penúltimo apoyo, contacto batida, despegue batida, y contacto colchoneta). El ajuste de las coordenadas se realizó utilizando el polinomio spline de quinto grado (Wood & Jennings, 1979).

Para la determinación del marco de calibración se utilizaron 2 postes de aluminio de 2,92 m de longitud con base cuadrada de  $0.36$  m<sup>2</sup> y marcas de 0.02 m de ancho cada 0.5 m. Este marco de calibración tenía

unas medidas de 10 m x 5 m x 2.92 m y abarcaba los dos últimos pasos de carrera, la batida, y el paso del listón. La digitalización del marco de calibración se realizó en cada una de las cámaras utilizadas, antes y después de cada campeonato, siguiendo una secuencia de siete puntos por poste (gráfico 1).



**Gráfico 1. Digitalización del marco de calibración en el campeonato senior (secuencia de puntos perimetrales 8-14)**

Se utilizaron 22 puntos anatómicos para representar un modelo mecánico de 14 segmentos de forma que las coordenadas 3D de posición de todos los puntos digitalizados y del CM se calculaban a través de la técnica de Transformación Lineal Directa (TLD) (Abdel-Aziz & Karara, 1971). Este modelo mecánico se digitalizó en el programa *Kwon 3D 3.1* (Visol Inc., Korea) de forma manual y siguiendo las indicaciones de Bahamonde y Stevens (2006) (gráfico 2). El modelo de masas se basó en los parámetros inerciales propuestos por DeLeva (1996) para mujeres adultas y fueron introducidos de forma manual en el pro-



**Gráfico 2. Digitalización del punto anatómico "talón izquierdo" en la saltadora 1ª clasificada de la final en el Campeonato de España absoluto de pista cubierta 2009**

grama. El suavizado de los datos se realizó aplicando un filtro *Low-pass Butterworth de 2º orden* a 6 Hz (Winter, Sidwall, & Hobson, 1974). Todas las digitalizaciones fueron realizadas por uno de los investigadores. La prueba de fiabilidad determinó estabilidad del criterio de marcación ( $ICC > 0.990$ ; ANOVA sin diferencias).

Los parámetros cinemáticos de eficacia técnica se fijaron tomando como referencia las variables analizadas en el estudio de Blažević et al. (2006). Las variables analizadas fueron: altura del listón (HL), longitud penúltimo paso (LPP), frecuencia penúltimo paso (FPP), velocidad horizontal penúltimo paso (VhPP), longitud último paso (LUP), frecuencia último paso (FUP), velocidad horizontal último paso (VhUP), distancia frontal de batida (DF), ángulo de la rodilla al inicio de la batida (KTD), ángulo de la pierna con la vertical al inicio de la batida (L0), distancia entre el CM y el apoyo (CM/AP), velocidad horizontal al inicio de la batida (Vh0), velocidad vertical al inicio de la batida (Vv0), altura del CM al inicio de la batida (H0), velocidad horizontal al final de la batida (VhTO), velocidad vertical al final de la batida (VvTO), altura del CM al final de la batida (H1), velocidad batida del CM (Vr), duración de la batida (TB), ángulo de batida del CM (TOA), altura de vuelo (H2), eficacia de franqueo (H3), altura máxima del CM (Hmax), y altura del CM sobre el listón (HCML).

Estos parámetros cinemáticos fueron calculados en un programa de creación propia que se basaba en las coordenadas 3D obtenidas de la digitalización y utilizaba diferentes rutinas de cálculo para determinar el valor de cada uno de ellos.

### **Análisis estadístico**

A nivel descriptivo se calcularon las medias aritméticas y las desviaciones estándar. A nivel inferencial, para determinar la correlación de los parámetros analizados con el rendimiento del salto, se aplicó una prueba de contraste de normalidad para las variables analizadas a través del test no paramétrico de *Kolmogorov-Smirnov para una muestra*. Esta prueba dio información sobre si la distribución de contraste era la normal en todos los grupos de saltadores. Para el cálculo de las variables que tienen una correlación significativa con el rendimiento se aplicó el test de correlación de *Spearman*. El nivel de significación para los tests estadísticos se fijó en un valor de  $p < 0.05$ .

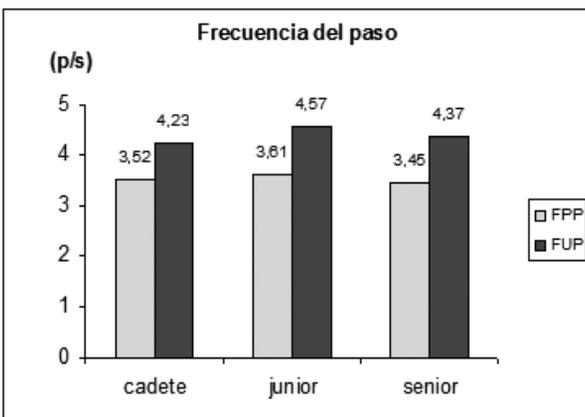
## **RESULTADOS**

En relación a las variables cinemáticas relacionadas con la fase de ante-salto (tabla I), se observó una tendencia a incrementar el valor de los datos registrados

**Tabla 1. Valor medio y desviación estándar para las variables cinemáticas analizadas en la fase de ante-salto del salto de altura en los tres grupos de edad (cadete, junior y senior) del Campeonato de España en pista cubierta**

Variable	Cadete	Junior	Senior
LPP (m)	1.73 ± 0.24	1.78 ± 0.18	1.83 ± 0.14
FPP (p/s)	3.52 ± 0.50	3.61 ± 0.33	3.45 ± 0.29
VhPP (m/s)	5.71 ± 0.26	6.36 ± 0.20	6.43 ± 0.22
LUP (m)	1.61 ± 0.14	1.66 ± 0.11	1.77 ± 0.08
FUP (p/s)	4.23 ± 0.36	4.57 ± 0.40	4.37 ± 0.27
VhUP (m/s)	5.62 ± 0.29	6.05 ± 0.18	6.20 ± 0.16

LPP - longitud penúltimo paso; FPP - frecuencia penúltimo paso; VhPP - velocidad horizontal penúltimo paso; LUP - longitud último paso; FUP - frecuencia último paso; VhUP - velocidad horizontal último paso



**Gráfico 3. Comparación del valor registrado en la frecuencia del penúltimo (FPP) y último (FUP) paso de carrera para las categorías de edad cadete, junior y senior**

en los parámetros de longitud (LPP, LUP) y velocidad del paso (VhPP, VhUP), en los dos últimos pasos de carrera. Esta tendencia no se encontró en el valor de la frecuencia del paso (FPP, FUP). Los datos correspondientes a la frecuencia del paso tenían un comportamiento irregular, registrando el máximo valor en la categoría junior (gráfico 3).

En relación a las variables cinemáticas relacionadas con la fase de batida (tabla 2), se observó una tendencia general a incrementar el valor de los datos

registrados. Esta tendencia no se produjo en la distancia frontal de batida (DF), recorrido vertical del CM ( $\Delta H$ ), ángulo de la rodilla al inicio de la batida (KTD), altura del CM al inicio de la batida (H0) y duración de la batida (TB). El valor registrado en las variables DF, KTD y H0 presentó el mínimo valor en la categoría de edad junior. El valor registrado en las variables  $\Delta H$  y TB presentó el máximo valor en la categoría de edad junior. El valor registrado en la variable velocidad vertical al inicio de la batida (Vv0) disminuyó

**Tabla 2. Valor medio y desviación estándar para las variables cinemáticas analizadas en la fase de batida del salto de altura en los tres grupos de edad (cadete, junior, y senior) del Campeonato de España en pista cubierta**

Variable	Cadete	Junior	Senior
DF (m)	0.75 ± 0.15	0.49 ± 0.22	0.80 ± 0.15
KTD (°)	157.18 ± 6.01	154.88 ± 7.67	156.25 ± 3.76
LO (°)	26.45 ± 2.94	28.11 ± 3.58	29.41 ± 1.97
CM/AP (m)	0.57 ± 0.03	0.60 ± 0.06	0.63 ± 0.03
Vh0 (m/s)	5.39 ± 0.37	5.73 ± 0.30	6.03 ± 0.23
Vv0 (m/s)	0.25 ± 0.17	0.14 ± 0.20	0.11 ± 0.14
H0 (m)	0.88 ± 0.05	0.86 ± 0.03	0.91 ± 0.05
VhTO (m/s)	3.66 ± 0.41	3.80 ± 0.34	4.02 ± 0.24
VvTO (m/s)	3.20 ± 0.21	3.28 ± 0.20	3.50 ± 0.22
H1 (m)	1.17 ± 0.07	1.17 ± 0.06	1.21 ± 0.05
$\Delta H$ (m)	0.28 ± 0.03	0.31 ± 0.03	0.29 ± 0.02
Vr (m/s)	4.87 ± 0.38	5.03 ± 0.30	5.34 ± 0.18
TB (s)	0.143 ± 0.01	0.147 ± 0.01	0.138 ± 0.00
TOA (°)	40.63 ± 3.20	40.22 ± 2.77	40.58 ± 3.05

DF - distancia frontal de batida; KTD - ángulo de la rodilla al inicio de la batida; LO - ángulo de la pierna con la vertical al inicio de la batida; CM/AP - distancia entre el CM y el apoyo; Vh0 - velocidad horizontal al inicio de la batida; Vv0 - velocidad vertical al inicio de la batida; H0 - altura del CM al inicio de la batida; VhTO - velocidad horizontal al final de la batida; VvTO - velocidad vertical al final de la batida; H1 - altura del CM al final de la batida;  $\Delta H$  - recorrido vertical de aceleración del CM; Vr - velocidad batida del CM; TB - duración de la batida; TOA - ángulo de batida del CM

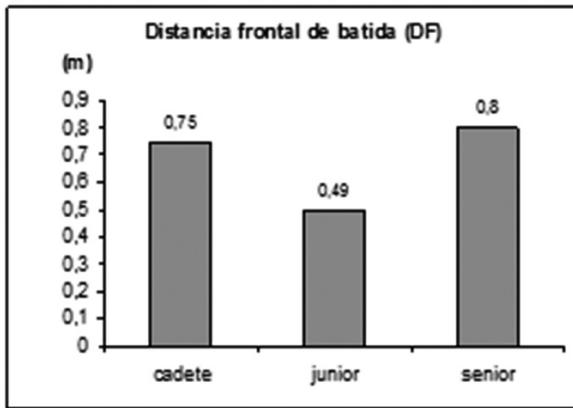


Gráfico 4. Comparación del valor registrado en la distancia frontal de batida para las categorías de edad cadete, junior y senior

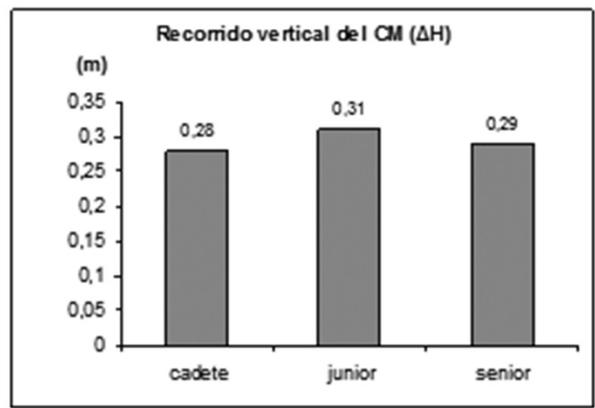


Gráfico 5. Comparación del valor registrado en el recorrido vertical del CM para las categorías de edad cadete, junior y senior

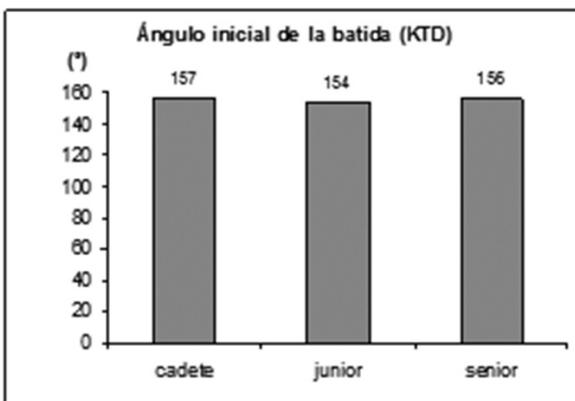


Gráfico 6. Comparación del valor registrado en el ángulo de la rodilla al inicio de la batida para las categorías de edad cadete, junior y senior

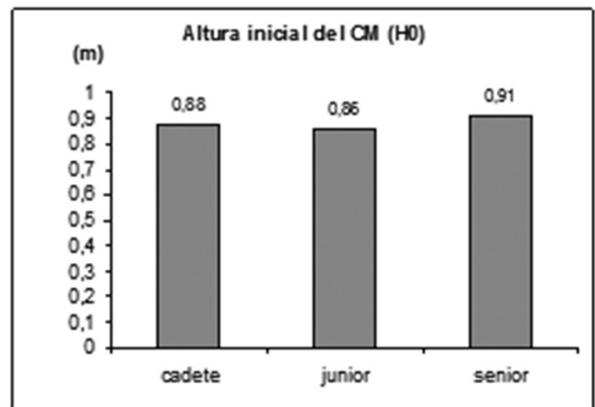


Gráfico 7. Comparación del valor registrado en la altura del CM al inicio de la batida para las categorías de edad cadete, junior y senior

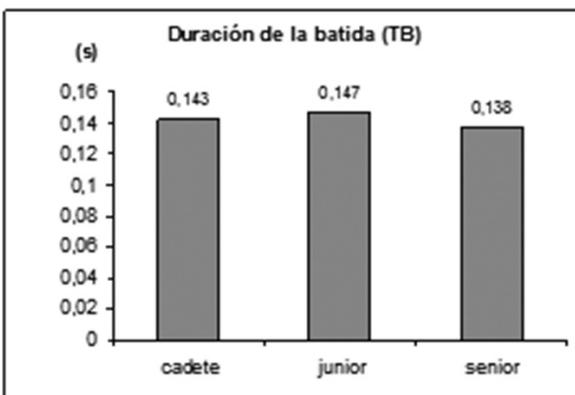


Gráfico 8. Comparación del valor registrado en la duración de la batida para las categorías de edad cadete, junior y senior

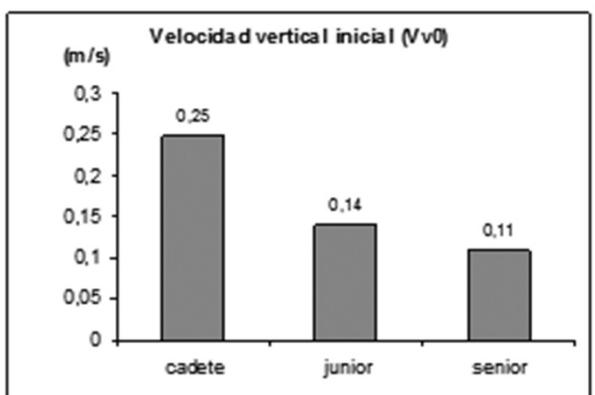


Gráfico 9. Comparación del valor registrado en la velocidad vertical del CM al inicio de la batida para las categorías de edad cadete, junior y senior

su valor al incrementar la categoría de edad de las saltadoras. El ángulo de proyección del CM al final de la batida (TOA) no sufrió variaciones.

En relación a las variables cinemáticas relacionadas con la fase de paso del listón (tabla 3), el valor de los datos registrados en la altura del listón (HL), altura de vuelo (H2) y altura máxima del CM (Hmax) se incrementó con la edad de las saltadoras de altura. La eficacia de franqueo (H3) disminuyó su valor al incrementar la categoría de edad. El valor registrado para la altura del CM sobre el listón (HCML) presentó un comportamiento irregular, fijando el mínimo valor en la categoría de edad junior.

En relación a la estadística inferencial de los valores medios correlacionados con el rendimiento del salto (Hmax), la variable altura del CM sobre el listón (HCML) mostró la mayor correlación en las tres categorías de edad analizadas con un nivel de significación  $p < 0.01$ : cadete ( $r = 0.998$ ), junior ( $r = 0.928$ ) y senior ( $r = 0.970$ ).

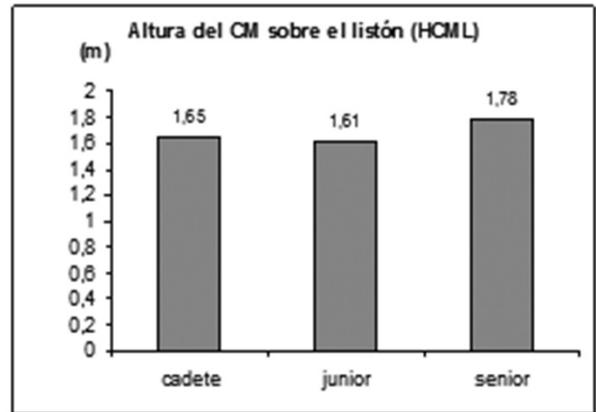
**Tabla 3. Valor medio y desviación estándar para las variables cinemáticas analizadas en la fase de paso del listón del salto de altura en los tres grupos de edad (cadete, junior y senior) del Campeonato de España en pista cubierta**

Variable	Cadete	Junior	Senior
HL (m)	1.55 ± 0.03	1.59 ± 0.05	1.73 ± 0.08
H2 (m)	0.47 ± 0.05	0.49 ± 0.05	0.58 ± 0.08
H3 (m)	0.09 ± 0.02	0.07 ± 0.04	0.06 ± 0.02
Hmax (m)	1.65 ± 0.03	1.66 ± 0.08	1.79 ± 0.10
HCML (m)	1.65 ± 0.03	1.61 ± 0.10	1.78 ± 0.10

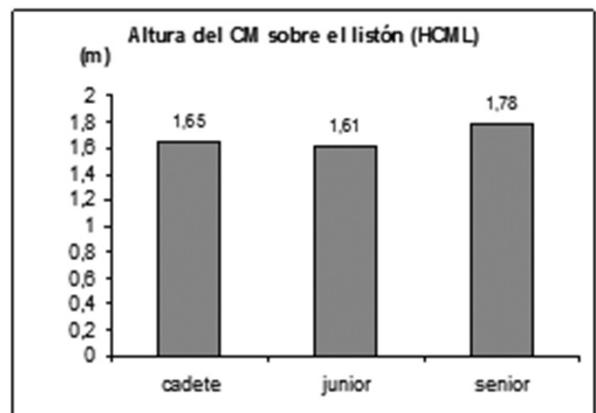
HL - altura del listón; H2 - altura de vuelo; H3 - eficacia de franqueo; Hmax - altura máxima del CM; HCML - altura del CM sobre el listón

En la categoría cadete, cuatro variables presentaban correlación estadística con un nivel de significación  $p < 0.05$ : velocidad vertical al inicio de la batida ( $Vv0$ ,  $r = 0.680$ ), altura del CM al inicio de la batida ( $H0$ ,  $r = 0.637$ ), velocidad vertical del CM al final de la batida ( $VvTO$ ,  $r = -0.603$ ) y altura del CM al final de la batida ( $H1$ ,  $r = 0.667$ ). Todas las variables mostraban correlación positiva con el rendimiento del salto, excepto para  $VvTO$  que presentaba correlación negativa.

En la categoría de edad junior, dos variables mostraban correlación positiva con el rendimiento del salto



**Gráfico 10. Comparación del valor registrado en la eficacia de franqueo para las categorías de edad cadete, junior y senior**



**Gráfico 11. Comparación del valor registrado en la altura del CM sobre el listón para las categorías de edad cadete, junior y senior**

con un nivel de significación  $p < 0.05$ : recorrido vertical de aceleración del CM ( $\Delta H$ ,  $r = 0.679$ ) y eficacia de franqueo (H3,  $r = 0.773$ ).

En la categoría senior, cuatro variables mostraron correlación estadística con el rendimiento con un nivel de significación  $p < 0.05$ : longitud del penúltimo paso (LPP,  $r = 0.607$ ), velocidad horizontal del CM al inicio de la batida ( $Vh0$ ,  $r = 0.642$ ), recorrido vertical de aceleración del CM ( $\Delta H$ ,  $r = 0.605$ ) y ángulo de batida del CM (TOA,  $r = 0.6.99$ ). En esta categoría de edad, cuatro variables mostraron correlación estadística con un nivel de significación  $p < 0.01$ : velocidad horizontal del penúltimo paso ( $VhPP$ ,  $r = 0.754$ ), ángulo de la pierna con la vertical al inicio de la batida (L0,  $r = 0.765$ ), velocidad vertical del CM al final de la batida ( $VvTO$ ,  $r = 0.733$ ) y altura de vuelo (H2,  $r = 0.872$ ). Todas las variables tenían correlación positiva con el rendimiento.

## DISCUSIÓN

El análisis biomecánico es una parte fundamental para el entrenamiento de la técnica en el alto rendimiento (Jaitner, 2002). Los resultados de este estudio aportan información sobre el patrón de ejecución de saltadoras de élite de diferente categoría de edad. A nivel global, los resultados muestran que a mayor categoría de edad, lo normal es que incremente el valor de los parámetros de evaluación técnica. Esto puede ser debido a la estabilización de las características antropométricas, el desarrollo de las capacidades físicas, y/o una mayor cantidad de entrenamiento técnico. En la misma línea se encuentra que la velocidad vertical del CM al inicio de la batida, la altura del CM sobre el listón, y la eficacia de paso del CM por el listón disminuyen su valor. Estos resultados podrían ser causa de un mayor número de años de entrenamiento técnico y de la estabilización del cuerpo (mejor percepción del esquema corporal). El comportamiento irregular en el valor de la frecuencia del penúltimo paso de carrera (cadete 3.52 p/s, junior 3.61 p/s, y senior 3.45 p/s) y último paso de carrera (cadete 4.23 p/s, junior 4.57 p/s, y senior 4.37 p/s) podría deberse a la tipología de salto utilizada por las saltadoras de categoría junior (más próximo al salto en potencia que al salto en velocidad). No obstante, son necesarios más estudios que confirmen estos resultados ya que la baja frecuencia de muestreo y la sincronización manual de las cámaras empleadas en este estudio puede afectar sobre los resultados.

Las diferentes tipologías o tendencias de salto (salto en potencia o salto en velocidad) fueron descritas por Reid (1986). El salto que implica una tipología en velocidad presenta, en relación a un salto con tipología en potencia: mayores valores en cuanto a la variable velocidad horizontal del CM durante la parte final del salto (VhPP y VhUP), una ubicación más alejada del punto de batida respecto al listón como consecuencia de esta mayor velocidad de aproximación (DF), mayor duración de la fase de batida (TB), menor pérdida de velocidad horizontal al final de la batida (VhTO) y menor altura del CM al final de la batida (H1).

Al comparar a nivel global los tres grupos de edad analizados, se observa que las saltadoras de categoría junior presentan: mayor frecuencia de los dos últimos pasos de carrera, mayor proximidad del punto de batida al listón, mayor flexión inicial de rodilla en la batida, ubicación más próxima al suelo del CM al inicio de la batida, mayor duración de la batida, y aumento del recorrido vertical del CM. Estos datos son indicativos de la realización de un salto más cercano al salto en potencia que al salto en velocidad, de acuerdo a los puntos clave propuestos por Reid

(1986). Las saltadoras de categoría cadete y senior, por contra, estarían utilizando una tipología de salto en velocidad.

Existen dos explicaciones que podrían justificar las diferencias entre la categoría de edad junior (salto más próximo al salto en potencia) y las categorías de edad cadete y senior (salto más próximo al salto en velocidad): a) Un mal talonamiento o b) importancia de la altura de vuelo (H2) y de los factores que la crean.

a) Un talonamiento de aproximación al listón no adecuado como consecuencia del incremento en la frecuencia de los dos últimos pasos de carrera puede producir una mayor proximidad del punto de batida al listón. Esto influye sobre la flexión inicial de rodilla incrementándola y produciendo en consecuencia una disminución en la altura del CM al inicio de la batida.

b) importancia de la altura de vuelo (H2) y de los factores que la crean. El incremento en el H2 al evolucionar de categoría junior a la categoría senior se puede asociar con diferencias en relación a la creación de momento angular total lo que permitirá un buen franqueo: Esto da origen a soluciones técnicas temporales que evolucionan y/o cambian a lo largo del proceso de formación del saltador.

Los resultados encontrados hacen hincapié en la necesidad de establecer criterios objetivos y fundamentados empíricamente al realizar el análisis y control del patrón motor del salto de altura femenino. En este sentido, los resultados de este estudio no coinciden con los aspectos clave propuestos por Bravo, Ruf y Vélez (2003), Carr (1999), Tellez (1993), y Tidow (1993) para el análisis de la técnica del salto de altura. Estos autores establecen un elevado número de aspectos a observar y sin diferenciar entre la evaluación del modelo técnico masculino y femenino. En este estudio se concluye un número más reducido de aspectos clave para el entrenador del salto de altura femenino en saltadoras de élite.

En categoría cadete, el rendimiento parece estar más asociado a parámetros influenciados por las características antropométricas (H0 y H1). Esto posiblemente se deba a que el menor volumen de trabajo físico y técnico hace que estos aspectos reduzcan relativamente su importancia sobre el rendimiento. En categoría junior, el rendimiento parece estar más asociado a la efectividad de la acción técnica sobre el listón, y al recorrido del CM durante la batida. Esto posiblemente se deba a la teórica mayor capacidad física y técnica, provocada por el entrenamiento, y puede ser la causa de la tendencia observada al realizar un salto más próximo al salto en potencia. En

categoría senior, el valor de la altura de vuelo incrementa su importancia en el rendimiento del salto. Esta altura está relacionada directamente con el valor de la velocidad vertical del CM al final de la batida, que está determinada por la velocidad horizontal al inicio de la batida, el recorrido vertical del CM, y el ángulo de la pierna al inicio de la batida.

Los resultados encontrados coinciden con los estudios de Čoh (1987), Krazhev, Strizhak, Popov y Bobronik (1990), Brüggemann y Loch (1992), Slamka y Moravec (1999), Dapena (2000), y Greig y Yeadon (2000), que indican que la VvTO es una variable importante para la consecución de un elevado rendimiento en la prueba de salto de altura. Este aspecto en el presente estudio sólo se ha encontrado en las categorías cadete y senior, no en la categoría junior porque presenta una tipología de salto más próxima al salto en potencia. En categoría cadete, el incremento en la VvTO se consigue aumentando el valor de  $Vh_0$  y KTD. En categoría senior, el aumento del  $\Delta H$  aumenta también la VvTO. Este incremento del  $\Delta H$  se logra principalmente por la disminución del valor de  $H_0$  (disminución de la longitud del paso y aumento de la inclinación lateral-frontal al inicio de la batida). En todas las categorías de edad estudiadas, las mayores VvTO son logradas por aquellas saltadoras que registran un tiempo de contacto en la batida menor.

Las variables determinantes del rendimiento en las saltadoras estudiadas han sido: en categoría cadete, altura del CM sobre el listón, velocidad vertical del CM al inicio de la batida, altura del CM al inicio de la batida, altura del CM al final de la batida, y velocidad vertical del CM al final de la batida; en categoría junior, altura del CM sobre el listón, recorrido vertical de aceleración del CM, y eficacia de paso del CM por el listón; en categoría senior, altura del CM sobre el listón, altura de vuelo del CM, ángulo de la pierna con la vertical al inicio de la batida, velocidad horizontal en el penúltimo paso de carrera, velocidad vertical del CM al final de la batida, ángulo de batida del CM, velocidad horizontal del CM al inicio de la batida, longitud del penúltimo paso de carrera, y recorrido vertical de aceleración del CM. Estos resultados indican la necesidad replantear los aspectos clave de referencia para el entrenamiento y la valoración técnica del salto de altura femenino dentro del proceso de formación.

Los resultados fueron recogidos en una competición puntual (transversal) y en la que la muestra estaba seleccionada (mejores saltadores de cada categoría). Se debe tener en cuenta que los actuaciones

valoradas pueden no reflejar el estado de forma del deportista. No se controló información relativa al entrenamiento llevado a cabo por los deportistas, la existencia de lesiones, etc. Por todo ello, los resultados únicamente se pueden extrapolar a saltadores de altura nacionales de máximo nivel, con un rango de edad y de rendimiento determinado.

## CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue determinar los aspectos clave aplicables como criterios de evaluación para el análisis de la eficacia técnica del salto de altura femenino en diferentes categorías de edad. Los resultados muestran que el número de variables cinemáticas determinantes en el rendimiento es bajo y que estas modifican su importancia en las diferentes categorías de edad analizadas. El estudio aporta información sobre la evolución de los aspectos claves en salto de altura de categoría femenina, da valores de referencia, y criterios a considerar sobre la forma de las saltadoras de altura nacionales.

A partir de los resultados se pueden dar unas indicaciones básicas para poder conseguir un incremento de la velocidad vertical al final de la batida, que es el aspecto que mayor influencia tiene sobre la altura de vuelo del CM:

- 1) correr la parte final de la carrera con tiempos de contacto breves y disminución de la fase aérea para producir un incremento en la velocidad de aproximación del CM por aumento de la frecuencia del paso; y
- 2) llegar al inicio de la batida posicionando el pie delante de la cadera, con la pierna extendida, y con el tronco recto inclinado hacia atrás, para producir un incremento en el retraso del CM y en el ángulo de la pierna.

## Futuros estudios

A partir de la elaboración de este estudio surgen una serie de posibles líneas de investigación que se pueden abordar en futuras investigaciones: a) replicar el estudio aumentando el número de participantes analizados, ya que los datos son solo aplicables a la muestra analizada; b) analizar con la misma metodología a saltadoras de otras categorías de edad (infantil, juvenil y promesa); c) realizar un seguimiento longitudinal de las saltadoras desde las primeras edades de formación hasta la categoría senior; y d) evaluar otro tipo de variables que pueden condicionar el rendimiento (años y tipo de entrenamiento, lesiones del deportista, etc.).

## REFERENCIAS

- Abdel-Aziz, Y. I., & Karara, H. M. (1971). Direct Linear Transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *Symposium on close-range photogrammetry* (pp. 1-18). Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry.
- Andersen, T. B., & Hovgaard, H. (2006). Analysis and visualization of shot put using rotational technique. *XXIV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (p. 1). Salzburg: Austria.
- Bahamonde, R., & Stevens, R. (2006). Comparison of two methods of manual digitization on accuracy and time of completion. *XXIV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (pp. 680-684). Salzburg: Austria.
- Blažević, I., Antekolović, L., & Mejovšek, M. (2006). Variability of high jump kinematic parameters in longitudinal follow-up. *Kinesiology*, 38(1), 63-71.
- Bravo, J., Ruf, H., & Vélez, M. (2003). *Salto verticales*. Madrid: RFEA.
- Bruggemann, G., & Loch, M. (1992). The scientific research project at the III world championships in athletics: High jump. *New Studies in Athletics*, 7(1), 67-74.
- Carr, G. (1999). *Fundamentals of Track and Field* (2<sup>a</sup> ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Challis, S., & Yeadon, F. (1992). A biomechanical analysis of the women's high jump. *Athletics Coach*, 26(2), 20-25.
- Čoh, M. (1987). Stability and variability of kinematic and dynamic parameters in high jump. *Telesna kultura*, 35(4), 13-17.
- Conrad, A., & Ritzdorf, W. (1986). High jump. *New Studies in Athletics*, 1(4), 33-51.
- Dapena, J. (1993). Biomechanical studies in the high jump and the implications for coaching. *Modern Athlete and Coach*, 31(4), 7-12.
- Dapena, J. (1996). A biomechanical scientific support program for high jumpers. *XIV Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (pp. 68-80). Funchal: Madeira, Portugal.
- Dapena, J. (1997). Contributions of Angular Momentum and Catting to the Twist Rotation in High Jumping. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(2), 239-253.
- Dapena, J. (2000). The high jump. En: V. Zatsiorsky, *Biomechanics in sport*. Blackwell Science, pp. 285-311.
- Dapena, J., McDonald, C., & Cappaert, J. (1990). A Regression Analysis of High jumping technique. *Journal of Applied Biomechanics*, 6(3), 246-261.
- DeLeva, P. (1996). Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameter. *Journal of Biomechanics*, 29(9), 1223-1230.
- Greig, M. P., & Yeadon, M. R. (2000). The influence of touchdown parameters on the performance of a high jumper. *Journal of Applied Biomechanics*, 16(4), 367-378.
- Han, H., & Li, G. (2000). Kinematic analysis of the take-off in elite Chinese female high jumpers. *XVIII Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (p. 954). Hong Kong: China.
- Isolehto, J., Virmavirta, M., Kyröläinen, H., & Komi, P.V. (2007). Biomechanical analysis of the high jump at the 2005 IAAF World championship in athletics. *New Studies in Athletics*, 22(2), 17-27.

- Jaitner, Y. (2002). Comparative analysis of the take off in pole vault and long jump based on time-continuous data. *XX Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (pp. 133-136). Cáceres: Spain.
- Knudson, D. & Morrison, C. (2002). *Qualitative analysis of human movement*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Krazhev, V. D., Strizhak, A. P., Popov, G. I., & Bobronik, V. I. (1990). A biomechanical analysis of the technique of the world's top female high jumpers. *Soviet Sports Review*, 25(2), 64-65.
- Nolan, L., & Patritti, B. L. (2008). The take-off phase in transtibial amputee high jump. *Prosthetics and Orthotics International*, 32(2), 160-171.
- Ozolín, N. G. (1988). *Sistema contemporáneo de entrenamiento deportivo*. La Habana: Científico Técnica.
- Reid, P. (1986). The high jump. *New Studies in Athletics*, 1(1), 47-53.
- Ritzdorf, W., Conrad, A., & Loch, M. (1989). Intra-individual comparison of the jumps of Stefka Kostadinova at the II World Championships in Athletics Rome 1987 and the Games of the XXIV Olympiad Seoul 1988. *New Studies in Athletics*, 4(4), 35-41.
- Salo, A. (2002). Technical changes in hurdle clearances at the beginning of 110 m hurdle event – a pilot study. *XX Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (pp. 84-87). Cáceres: Spain.
- Salo, A., Grimshaw, P. N., & Viitasalo, J. T. (1999). The use of motion analysis as a coaching aid to improve the individual technique in sprint hurdles. *XVII Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (pp. 57-60). Perth: Australia.
- Schwameder, H. (2011). Aspects and challenges of applied sport biomechanics research. *XXIX Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (pp. 25-28). Porto: Portugal.
- Slamka, M., & Moravec, R. (1999). Optimization of run-up speed in the women's high jump. *Acta Facultatis Educationis Physicae Universitatis Comenianae*, 40, 193-202.
- Soto, V.M. (1995). *Desarrollo de un sistema para el análisis biomecánico tridimensional del deporte y la representación gráfica realista del cuerpo humano*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte, Universidad de Granada.
- Tan, J. C., & Yeadon, M. R. (2005). Why do high jumpers use a curved approach? *Journal of Sports Sciences*, 23(8), 775-780.
- Tellez, K. (1993). Elements of the high jump. *Track Technique*, 125, 3987-3990.
- Tidow, G. (1993). Model technique analysis-part VIII: The flop high jump. *New Studies in Athletics*, 8(1), 31-44.
- Van Gheluwe, B., Roosen, P., & Desloovere, K. (2003). Rearfoot kinematics during initial takeoff of elite high jumpers: estimation of spatial position and orientation of subtalar axis. *Journal of Applied Biomechanics*, 19(1), 13-27.
- Winter, D. A., Sidwall, H. G., & Hobson, D. A. (1974). Measurement and reduction of noise in kinematics of locomotion. *Journal of Biomechanics*, 7(2), 157-159.
- Wood, G. A., & Jennings, L. S. (1979). On the use of spline functions for data smoothing. *Journal of Biomechanics*, 12(6), 477-479.
- Xu, W., & Liu, M. (2005). Kinematic analysis of the run up, final stride and take-off technique in Chinese female Fosbury flop jumpers. *XXIII Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports* (pp. 447-448). Beijing: China.