

García-López, J.; Peleteiro, J. (2004). Tests de salto vertical (II): Aspectos biomecánicos. *RendimientoDeportivo.com*, N°7. <<http://www.RendimientoDeportivo.com/N007/Artic032.htm>> [Consulta 10/01/2005]



Tests de salto vertical (II): Aspectos biomecánicos.

García-López, J.; Peleteiro, J.

1) INTRODUCCIÓN

El análisis biomecánico del salto vertical (Figura 1) determina que el criterio de eficacia del salto es alcanzar la máxima altura del centro de gravedad ($H_{m\acute{a}x}$) (Hay, 1988). Ésta dependerá de la altura inicial del centro de gravedad (CG) cuando todavía se está apoyado en el suelo (H_d) y de la máxima altura del CG durante el vuelo (ΔH); a su vez, esta última dependerá de la velocidad de despegue (V_{zd}). Si profundizamos en este modelo se observa que, al margen de la masa del sujeto que salta (m) existen una serie variables cinéticas (fuerzas) que influyen en la altura del salto vertical y que dependen del impulso generado en el suelo (I_z), que es la suma del impulso de frenado (IF) y el impulso de aceleración (IA) generado durante la batida. Para Hochmuth (1973), cuando en la realización de un salto vertical máximo la relación IF/IA es de 1/3, se puede afirmar que dicho salto es óptimo, aunque esta hipótesis no ha sido aceptada en investigaciones más recientes (Dowling y Vamos, 1993).

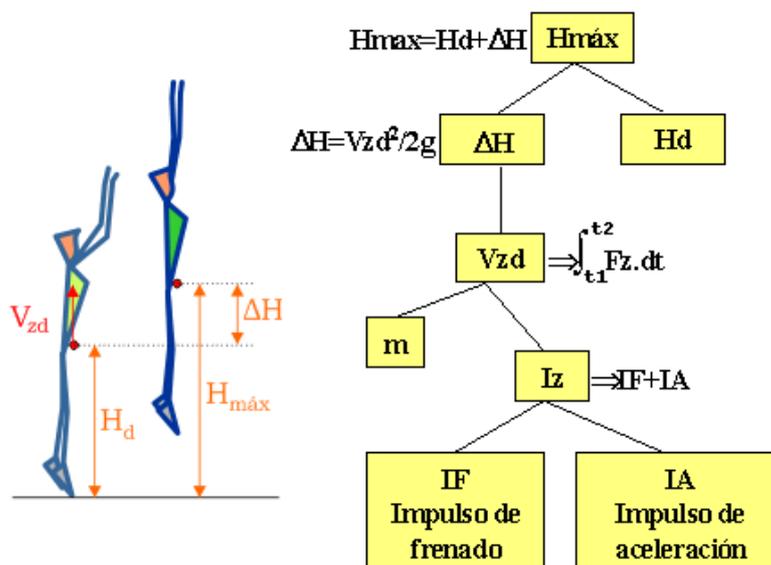


Figura 1: Análisis biomecánico del salto vertical (adaptado de Hay, 1988).

Como se ha expresado, $\Delta H = H_{m\acute{a}x} - H_d$, por lo que la medida directa de ΔH podría llevarse a cabo conociendo la posición exacta del CG en los momentos de despegue y de inversión en su trayectoria de vuelo (Hatze, 1998). Sin embargo, este proceder exige el uso de fotogrametría para calcular la posición del CG durante el salto, siendo una metodología que conlleva errores inherentes a su protocolo: identificación de puntos anatómicos, modelos segmentarios del cuerpo humano, utilización de parámetros inerciales, etc. (Kibele, 1998; Rodano, 2002). Esta circunstancia ha provocado que los autores utilicen otras metodologías para medir ΔH (Dowling y Vamos, 1993; Hatze, 1998; Baca, 1999).

Es importante conocer cuál es la validez y fiabilidad de los diferentes métodos con los que se puede medir la altura del salto vertical, ya que, por ejemplo, para valorar las mejoras debidas al entrenamiento en deportistas de élite, las variaciones de unos pocos centímetros son importantes. Por ello, los entrenadores y científicos deben asegurarse de que sus procedimientos no conllevan errores mayores que las diferencias que pretenden medir (Kibele, 1998). En el presente trabajo se explica y discute el fundamento de los diferentes métodos con los que se puede medir la altura del salto vertical, y posteriormente, se realiza un análisis comparativo entre todos ellos, basado en recientes investigaciones específicas. Para finalizar, se exponen las perspectivas de futuro sobre el uso de los métodos descritos y sobre algunos aspectos que todavía no han sido investigados.

2) MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA ALTURA DEL SALTO VERTICAL

En la actualidad existen gran número de procedimientos o rutinas para medir la altura del salto vertical: sobre una plataforma de fuerza se puede calcular la velocidad de despegue del CG y el tiempo de vuelo (Hornebeck, 1967), pero mediante técnicas fotogramétricas también se puede medir la velocidad de despegue del CG (Kibele, 1998), y sobre una plataforma de contacto se puede medir el tiempo de vuelo (Bosco, 1983); claro está, que también se puede medir la altura del salto vertical considerando la diferencia entre dos marcas realizadas con la mano como representativas del recorrido del CG durante el salto (Baca, 1999), etc. Se han publicado multitud de trabajos sobre el rendimiento en el salto vertical y los posibles factores que lo influyen, pero pocos trabajos se han ocupado del aspecto metodológico que conllevan las rutinas estándar utilizadas para medir el salto vertical (Kibele, 1998). Por ello, y para entender qué características tienen en común todos estos procedimientos los hemos clasificado en tres grandes categorías o metodologías:

1. Diferencia de marcas.
2. Integración numérica de los datos fuerza-tiempo de la batida.
3. Medición del tiempo de vuelo del salto vertical.

Posteriormente se compararán las similitudes y/o diferencias la altura del salto vertical registrada por cada una de ellas.

2.1. Diferencia de marcas

Esta metodología se basa en la medición de la distancia entre dos marcas (Figura 2a), pudiendo considerarse una parte del cuerpo como la mano (Sargent, 1921), la cintura (Abalakov, 1938; Dal Monte, 1983), la cabeza (Sébert y cols., 1990), etc. También se puede calcular el centro de gravedad como punto de marca (Figura 2b), para lo que es necesario considerar el cuerpo humano como un sistema de segmentos rígidos y llevar a cabo una filmación en vídeo o cine durante la realización del salto (Hatze, 1998).

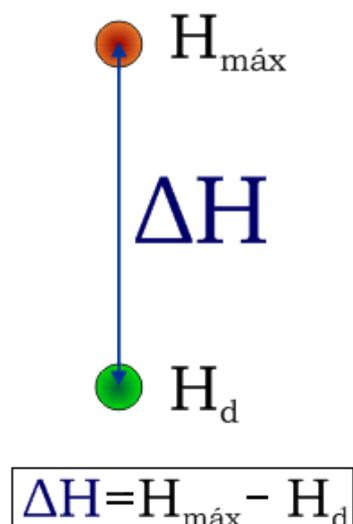


Figura 2a: Representación gráfica de la metodología de cálculo de la altura del salto vertical por diferencia de marcas.



Figura 2b: Análisis de la posición del CG durante un salto vertical.

Entre los posibles inconvenientes que conlleva utilizar esta metodología destacamos.

- La trayectoria del segmento corporal con el que se lleva a cabo la marca no tiene que ser necesariamente la misma que la descrita por el CG. Así por ejemplo, cuando Sébert y cols. (1990) colocan un arnés en la cabeza del sujeto que salta, la posición de ésta puede variar en el momento de máxima altura del salto con respecto al momento de despegue. Lo mismo ocurriría cuando se realiza un salto según la modalidad de Sargent (1921), ya que la extremidad superior y el costado del sujeto ejecutante pueden encontrarse mucho más estirados, y los hombros mucho más basculados en el momento de máxima altura del salto (Gusi y cols., 1997); etc. En un estudio donde se compararon las alturas de salto registradas por diferencia de marcas y por tiempo de vuelo durante la realización de saltos verticales desde parado y con carrera (modalidad de Sargent) desveló que existían diferencias significativas de 7.8 cm ($p < 0.01$) y 7cm ($p < 0.01$) a favor de la metodología de diferencia de marcas. La

explicación fue que en el salto según Sargent, las posiciones inicial y final del salto son muy diferentes a cuando el sujeto abandona y cae en la plataforma de contacto (Figura 3). Por ello se propuso modificar la posición inicial, realizando la marca con el sujeto puesto de puntillas, desapareciendo así las diferencias entre ambas metodologías y encontrando elevadas correlaciones cuando el salto se realizaba desde parado ($p < 0.001$), y algo inferiores en el salto con carrera ($p < 0.01$) (García-López y cols., 1999).

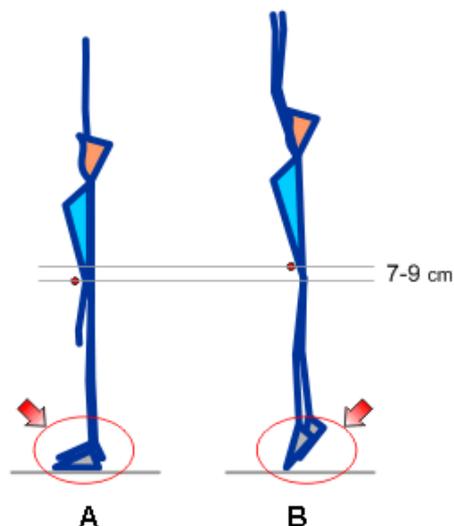


Figura 3: Diferencias entre las posiciones iniciales del salto en el Test de Sargent (A), y en los Tests sobre plataforma de contacto (B).

- El cálculo del CG exige la utilización de un modelo de segmentos del cuerpo humano: 9 segmentos (Yeadon, 1990), 14 segmentos (MacDonald y Dapena, 1991), 16 segmentos (Dempster, 1955; Plagenhoef, 1962), etc. A su vez, el modelo escogido debe ajustarse al modelo de los parámetros de inercia calculados para cada uno de los segmentos (Clauser y cols., 1969; Zatsiorsky y Seluyanov, 1985; deLeva, 1996; etc.); y ambos determinarán los puntos anatómicos que deben marcarse (Gutiérrez, 1999). Elegir uno u otro modelo de los parámetros de inercia resulta intrascendente para el cálculo de la altura del salto vertical, ya que se subestime o sobreestime ésta, se hará de una manera constante en los momentos de despegue, máxima altura y aterrizaje. Sin embargo, el modelo de segmentos del cuerpo sí puede afectar a los resultados; ya que considerar el tronco como un segmento rígido o como tres segmentos articulados, o el segmento tronco-cabeza en lugar de los segmentos tronco y cabeza puede alterar el cálculo del CG, y a su vez estos segmentos pueden estar dispuestos de manera diferente en las posiciones de despegue y aterrizaje (Kibele, 1998). Por último, los problemas ligados a los puntos anatómicos marcados son comunes a los descritos cuando se utiliza fotogrametría, y afectan a que la reproducibilidad del método sea menor: los puntos marcados sobre articulaciones no son fieles representantes de los centros articulares; a veces la digitalización no se realiza sobre marcadores colocados en el propio sujeto que salta; si se lleva a cabo un análisis 2D no deben quedar puntos ocultos; etc. (Soto, 1995).

2.2. Integración numérica de los datos fuerza-tiempo de la batida

Utilizando plataformas dinamométricas se pueden registrar las fuerzas de reacción con el suelo durante la batida del salto vertical con una precisión muy alta (100-1000Hz). Aplicando las fórmulas adecuadas podremos obtener la velocidad y el impulso a lo largo de toda la batida, calculando la altura del salto (ΔH) a partir de la velocidad de despegue y el efecto de la deceleración de la gravedad sobre ella (Hornbeck, 1967). Debido a las mejoras tecnológicas en las plataformas de nueva generación (calibración de la plataforma, conversión de los datos y frecuencia de muestreo) y a las dificultades para calcular la altura del salto por diferencia de marcas del CG, numerosos autores utilizan la integración numérica fuerza-tiempo como método de referencia para medir la altura del salto vertical (Dowling y Vamos, 1993; Kibele, 1998; Hatze, 1998; Baca, 1999).

Esta metodología se fundamenta en que, conociendo la masa del sujeto y los valores de fuerza durante la batida del salto, se puede calcular la aceleración que sufre el CG del saltador (igualdad entre impulso y cantidad de movimiento); y a partir de ésta y del tiempo, la velocidad del CG en cada instante de la batida (dependiendo de la frecuencia de medición de la plataforma). En la Figura 4 se representan las fuerzas verticales (F_z) y la velocidad vertical del CG (V_z) durante la batida de un salto vertical en contramovimiento (CMJ).

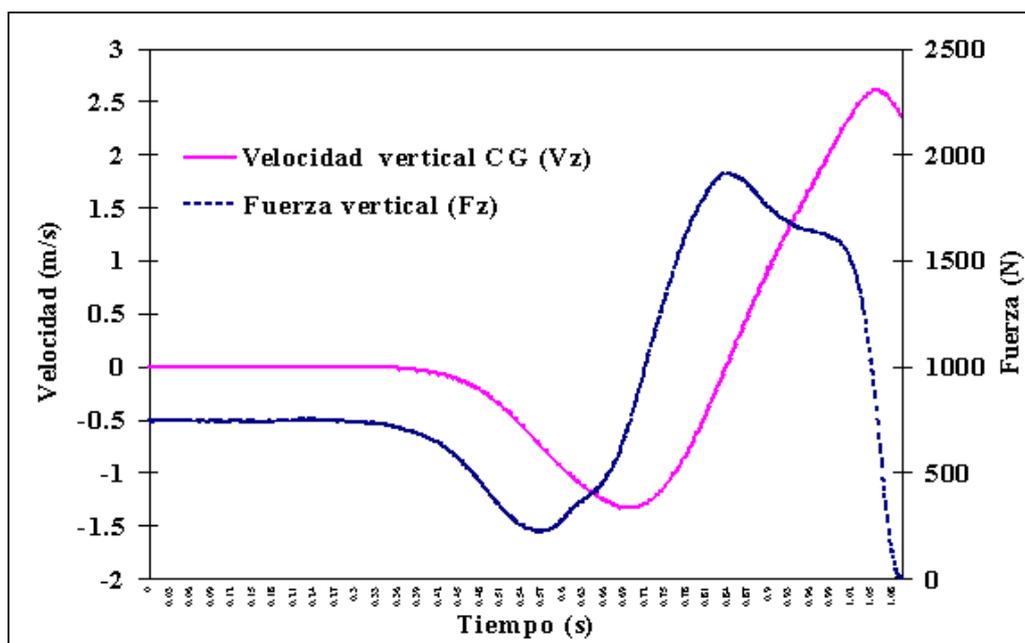


Figura 4: Curvas fuerza-tiempo (línea azul discontinua) y velocidad-tiempo (línea fucsia continua) de un salto vertical en contramovimiento (CMJ).

Restando el peso del sujeto (mg) a la fuerza vertical registrada en la plataforma (Fz) y dividiendo el resultado entre la masa (m) obtendremos la aceleración, que multiplicada por el intervalo de tiempo entre t_2 y t_1 (dt) nos dará la velocidad vertical del CG (Vz). La ecuación es la siguiente:

$$Vz = \int_{t_1}^{t_2} (Fz(t) - mg) dt/m$$

(donde Vz = velocidad vertical del CG en m/s; Fz = fuerza vertical en N; t_1 = instante previo al inicio del salto en s; t_2 = instante de despegue de la plataforma en s; m = masa en Kg)

Una vez obtenida la velocidad vertical del CG durante la batida (Vz) debemos identificar la velocidad en el momento de despegue (Vzd), que coincide con el instante en el que deja de registrarse fuerza en la plataforma. A partir de Vzd la altura del salto vertical (ΔH) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta H = Vz^2 / 2g$$

(donde ΔH = altura del salto en m; Vzd = velocidad vertical de despegue del CG en m/s; g = aceleración de la gravedad en m/s^2)

Entre los posibles inconvenientes que conlleva utilizar esta metodología destacamos:

- Determinación exacta del peso corporal (mg) y la masa (m) del sujeto antes del test. Kibele (1998) propone utilizar el "peso y la masa corporal específicos" durante la realización de un CMJ, para lo que se debe restar el valor de fuerza durante la fase aérea (entre el despegue y el aterrizaje) al valor medio de fuerza anterior al inicio del salto. Según este autor, el procedimiento descrito elimina los posibles cambios de fuerza en los sensores extensiométricos, aunque reconoce que es mucho más difícil aplicarlo cuando se realiza un SJ, porque los valores de fuerza anteriores al inicio del salto son más variables (exigencia de una flexión de rodillas a 90°). La variación del peso y de la masa en la realización de varios saltos verticales en una misma sesión no es superior a un 1%, por lo que prácticamente no afecta al cálculo de Vz y de la altura del salto.
- Calibración de la señal de fuerza y su conversión en dígitos. La calibración de la señal de fuerza de una plataforma dinamométrica se lleva a cabo mediante cargas lineales y estáticas, mientras que las fuerzas producidas durante el salto vertical son dinámicas y no lineales. Baca (1999) calibró sus plataformas de fuerza Kistler (1000Hz) previamente a la realización de un DJ; para ello utilizó cargas lineales mayores de 1000N, afirmando que este procedimiento no conllevaría un error mayor del 0.2%. Para Kibele (1998), si se utilizan el peso y la masa específicos del sujeto, el error en la medición de fuerzas sería constante para todas las medidas de fuerza (peso del sujeto y fuerza durante la batida), por lo que no afectaría al cálculo de Vz y de desplazamiento del CG. Respecto a los convertidores A/D utilizados, ambos autores consideran un convertidor A/D con una resolución de 12 ó 16 bits aporta suficiente resolución para considerar que los errores debidos a este componente son despreciables (Kibele, 1998; Baca, 1999).
- Frecuencia de muestreo de la plataforma de fuerza. Si la frecuencia de muestreo de los datos de fuerza es demasiado lenta, se producen errores en la integración numérica de la curva fuerza-tiempo (Baca, 1999), siendo mayor el error que puede introducirse al calcular Vz y el desplazamiento del CG

(≈2%). Esto ocurriría a lo largo de toda la batida, pero se identifican dos fases críticas, que son, el inicio del salto (error ≈0.1%) y el despegue (error ≈2%). Los estudios consultados utilizan frecuencias de muestreo muy diferentes: 100Hz (Dowling y Vamos, 1993), 1000Hz (Kibele, 1998; Baca, 1999) y 2000Hz (Hatze, 1998); pero el principal problema es determinar cuándo se inicia el salto y cuándo acontece la fase de vuelo. Para Kibele (1998), se puede llegar a cometer un error de 5 a 10 ms en determinar el inicio del salto sin que afecte considerablemente a los cálculos de integración, pero errores mayores de 2 a 3 ms en determinar el despegue del salto afectarían en gran medida a las variables Vz y desplazamiento del CG. Para no cometer este error se debería fijar un umbral de fuerza por debajo del peso (al inicio del salto) y otro umbral de fuerza por encima del valor "0" (en el despegue). Sólo este autor comenta que el umbral utilizado en su estudio fue de 5N en ambas fases, y que en la fase de despegue encontró un ritmo en el cambio de los valores de fuerza de 10 a 15 N/ms, por lo que el error al determinar el momento del despegue fue insignificante. Según Hatze (1998), su error fue menor del 0.41%, en tanto que pudo determinar el despegue con una precisión de ± 1ms; y según Baca (1999), su error fue menor del 2%, determinando este instante con una precisión de ± 2ms.

- Análisis de la Vz en un DJ. Para calcular la Vz durante la batida en un DJ es necesario conocer la velocidad del CG antes de que el sujeto contacte con la plataforma (Vo); esta velocidad será sumada a la Vz, que se calcula según la ecuación anteriormente expuesta. Si se conoce la altura de caída del DJ (H_{DJ}), Vo se puede calcular de dos formas: cuando sólo se dispone de una plataforma, a partir de H_{DJ} ($H_{DJ} = Vo^2/2g$); si se dispone de dos plataformas, adaptando el soporte de la caída a una de ellas y calculando Vz_d del soporte, que será sumada a Vo calculada según la ecuación anterior. Algunos autores han utilizado la primera metodología (Lees y Fahmi, 1994), aunque no debiera ser considerada como método de referencia, en tanto que el CG no desciende en caída libre desde esa altura, pudiendo impulsarse ligeramente los sujetos hacia arriba o dejarse caer sin liberar todo su peso del soporte de caída (Baca, 1999).

A pesar de los inconvenientes comentados, el método de integración numérica de los datos fuerza-tiempo de la batida puede considerarse como método de referencia, ya que en la medición de la altura del salto vertical el error será menor del 2% (Baca, 1999).

2.3. Medición del tiempo de vuelo (Tv) del salto vertical

El Tv de un salto vertical puede ser registrado mediante plataformas de contacto, plataformas dinamométricas, fotogrametría o sistemas optoelectrónicos paralelos a la superficie donde se realiza el salto (Bosco y cols., 1983; Dowling y Vamos, 1993; González, 1996; Viitasalo y cols., 1997). El cálculo de la altura del salto vertical (ΔH) es mucho menos complejo que el presentado en las dos metodologías anteriores, por lo que ha sido muy utilizado en la investigación científica en general (Komi y Bosco, 1978; Bosco y cols., 1983; Mijares, 1993; Mauriz y cols., 2000; etc.), y en la investigación sobre la valoración de los factores de rendimiento y los efectos del entrenamiento deportivo en particular (Martín, 1987; Viitasalo y cols., 1987; Vittori, 1990; Schmidtbleicher, 1992; Villa y cols., 1999; etc.). A partir del Tv se puede estimar ΔH aplicando la siguiente ecuación:

$$\Delta H = g \times T_v^2 / 8$$

(donde ΔH = altura del salto en m; g=aceleración de la gravedad en m/s²;
T_v= tiempo de vuelo en s).

Las principales críticas a la metodología de medición del Tv para estimar la altura del salto vertical hacen referencia a que las posiciones de despegue y aterrizaje durante el salto no son iguales, lo que ha sido demostrado a partir de la medición de los ángulos de rodillas, tobillos y caderas en dichos momentos; encontrando ángulos significativamente mayores para tobillos y caderas en el despegue que en el aterrizaje (el sujeto abandona la plataforma más estirado y con una mayor altura del CG que cuando vuelve a caer en la misma) (Kibele, 1998). Frick y cols. (1991), escogieron, de 91 saltos verticales, aquellos en los que las posiciones de aterrizaje y despegue eran iguales para su posterior análisis; así sólo pudieron analizar un total de 19 saltos.

El Tv en una plataforma dinamométrica se registra a partir del instante en el que el sujeto abandona la plataforma (t₁) y cuando vuelve a caer en la misma (t₂) (Figura 5), de manera que $T_v = t_2 - t_1$. Para determinar t₁ y t₂ es necesario considerar un valor de fuerza vertical (Fz) igual a "0"; pero este valor casi nunca se registra, debido a las vibraciones generadas durante el propio salto; por ello, se debe utilizar un umbral de fuerza como el que se ha descrito en párrafos anteriores (Kibele, 1998).

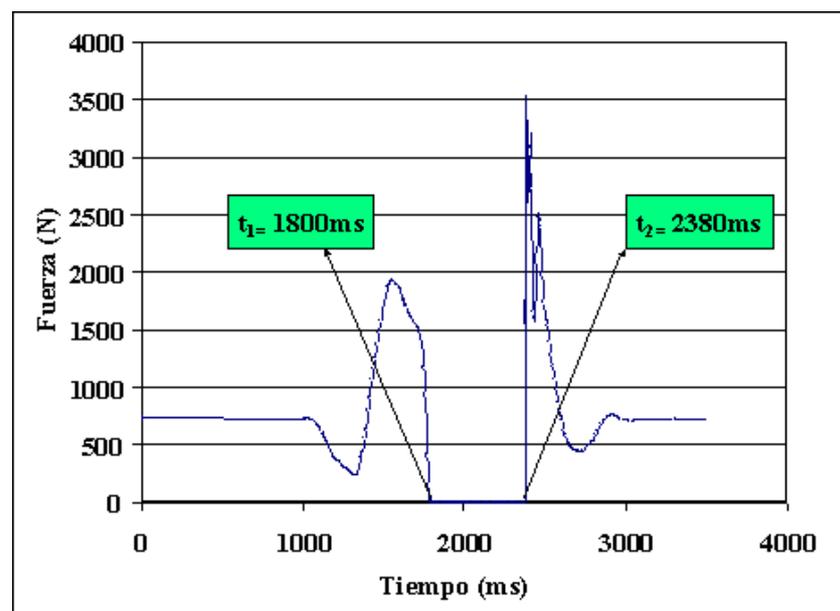


Figura 5: Curva fuerza-tiempo (Fz-t) de la batida de un CMJ sobre plataforma dinamométrica. Instante de despegue (t1) y aterrizaje (t2) del salto.

Utilizando fotogrametría, el Tv se registra considerando t1 al instante en el que ninguno de los dos pies se encuentra en contacto con el suelo durante el despegue, y t2 al instante anterior a la recepción del salto, cuando todavía ninguno de los pies ha contactado con el suelo (González, 1996). La precisión en el registro del Tv dependerá de la frecuencia de filmación del sistema, en tanto que no resulta difícil determinar cuándo los pies abandonan o vuelven al suelo, puesto que las velocidades de despegue y aterrizaje son elevadas (2.8m/s para un salto de 0.4m). En la Figura 6 se ilustra el fotograma anterior al despegue de los pies de la superficie; esta imagen fue filmada con una cámara digital de 500Hz.



Figura 6: Protocolo utilizado para medir el tiempo de vuelo durante el salto mediante fotogrametría. Imagen digital a 500Hz.

También se pueden utilizar sistemas optoeléctricos paralelos al suelo para medir el tiempo de vuelo. Así, Viitasalo y cols. (1997), diseñaron el *Photocell Contact Mat*, que consiste una banda de emisores y receptores fotosensibles de luz láser conectados a un ordenador que registran el tiempo de apoyo y de vuelo durante la carrera (Figura 7). Este sistema pueden ser aplicado para medir el tiempo de vuelo y de contacto de un salto vertical; además, es el único validado y publicado en revistas científicas especializadas (Viitasalo y cols., 1997). Los inconvenientes que presenta son dos: sobreestima el tiempo de contacto y subestima el tiempo de vuelo, en mayor medida cuando el haz se coloca más separado del suelo; además, es difícil ajustar correctamente el haz láser desde una distancia lejana. Se tiene constancia de la existencia de un sistema con un fundamento similar al *Photocell Contact Mat*, el *Ergo Jump Bosco/System* de infrarrojos (AFR, 2002), cuya única diferencia con el anterior es la utilización de luz infrarroja y no láser. Teóricamente los inconvenientes que presentaría para medir el tiempo de vuelo de un salto vertical serían los mismos que se han descrito con anterioridad, aunque no podemos confirmarlo por la ausencia de estudios que validen el *Ergo Jump Bosco/System* de infrarrojos.

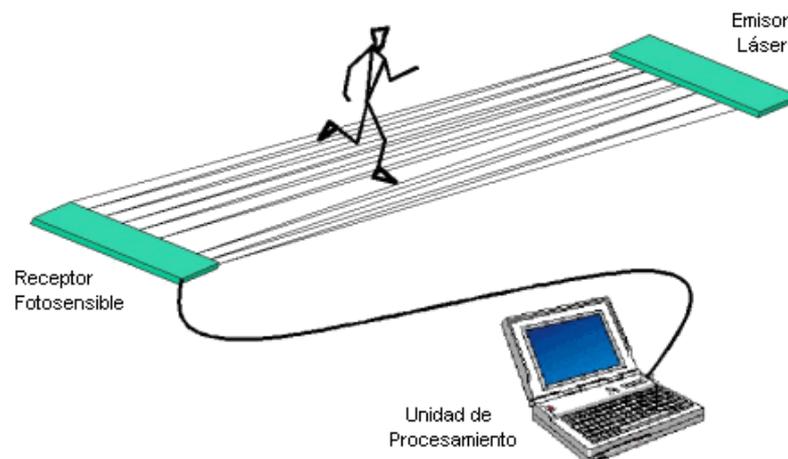


Figura 7: *Photocell Contact Mat* para la medición de tiempos de contacto y de vuelo durante la carrera (adaptado de Viitasalo y cols., 1997).

Para evaluar la capacidad de salto, bien mediante un salto o mediante una sucesión continua o intermitente de los mismos, también se ha propuesto la utilización de diferentes plataformas de contacto (Figura 8). Se ha destacado que el Tv es la metodología más sencilla para estimar la altura del salto vertical cuando se compara con la diferencia de marcas (posición del CG) y con la integración numérica; pero debe destacarse también que de los sistemas utilizados para medir el Tv, las plataformas de contacto quizás sean las que ofrecen los valores de Tv de manera más rápida, así como las más fáciles de instalar. Por ello, han sido las más utilizadas para valorar el salto vertical en el ámbito del entrenamiento deportivo, diseñándose, como se expone a continuación, multitud de modelos de plataformas.



Figura 8: Esquema de los componentes de un sistema de medición con plataforma de contacto.

La plataforma de contacto *Ergo Jump Bosco/System* (Bosco y cols., 1983), quizás la más conocida, usada y comercializada, está compuesta por un microprocesador *Psion Organiser II*, un interface plataforma-microprocesador y una plataforma mecánica donde se realizan los saltos. Se supone que la precisión de este sistema es de 1000Hz, aunque no existen estudios científicos que la validen; por eso algunos autores han encontrado problemas en la sensibilidad de la plataforma mecánica (necesidad de una gran presión para accionarla y excesiva separación de los sensores que conforman el circuito), y en la conservación y reparación de la misma (González, 1996). Esta plataforma no permite registrar los saltos uno a uno durante el protocolo de saltos repetidos (RJ), obteniéndose información tan sólo del tiempo total de vuelo y de contacto de la totalidad de la secuencia de saltos, así como del número de saltos (Bosco, y cols., 1983); y además, presenta problemas ligados a la recogida y almacenamiento de datos, ya que los contadores externos disponen de su propio microprocesador, no compatible con entornos de usuario (*Psion Organiser II*, 1996).

En esta misma línea tenemos constancia de la existencia de, al menos, dos equipos de similares características: Una alfombra *Tapewitch Signal Mat, Model CVP 1723* conectada a un reloj contador *Lafayette Instrument Co Model 54035* a través de un adaptador-inversor *Lafayette Instrument Co 663514-AS*, con una precisión de 1000Hz (Mijares y cols., 1995); y un equipo *DIGITIME 1000* (Luhtanen, 1984), que consta de 3 pares de células fotoeléctricas, una placa resistiva para los saltos, un medidor de tiempo de reacción y un cronómetro digital, también con precisión de 1000Hz. Aunque son sistemas menos utilizados, tampoco se han validado.

Se ha constatado la existencia de otras plataformas de contacto y contadores de Tv, que se basan en el mismo principio de un cuerpo en caída libre, pero que al ser fabricados en países del Este y retardada su mención bibliográfica, no fueron apreciadas en el mercado deportivo (Alixanov y Alixanova, 1987; Petrov y Zujev, 1987). En ambos casos la precisión del sistema se supone que es de 100Hz, pero ninguna de ellas ha sido validada.

3) ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL SALTO VERTICAL

En este apartado se analizan las diferencias encontradas al estimar la altura del salto vertical con las metodologías de diferencia de marcas del CG (DM), integración numérica (IN) y tiempo de vuelo (Tv). Igualmente se identifican las variables cinéticas que predicen el rendimiento en el salto, proponiéndose una serie de estrategias para minimizar las diferencias y llevar a cabo futuros estudios sobre salto vertical.

3.1. Posibilidades y limitaciones en el análisis biomecánico de los saltos con contramovimiento

Kibele (1998), comparó las metodologías de DM, IN y Tv durante la realización de un salto vertical máximo en contramovimiento (CMJ) de 4 hombres y 4 mujeres (n=8). Para ello los sujetos realizaron el CMJ encima de una plataforma de fuerza (Kistler, modelo 9281, precisión 1000Hz), filmándose lateralmente el salto utilizando una cámara de alta velocidad (200Hz) para su posterior análisis en 2D. El modelo de CG utilizado fue el de Dempster (1955), corregido por Barham en 1978, que básicamente considera un comportamiento simétrico de brazos y piernas durante el salto vertical, por lo que sólo utiliza 10 puntos anatómicos de referencia (punta del dedo pequeño del pie, quinta articulación metatarsofalángica, talón, tobillo, rodilla, cadera, centro de la oreja, muñeca, codo y hombro).

Los resultados expuestos en las Tablas 1 y 2 reflejan que el método DM sobreestima la altura de salto respecto a IN (8.2%) y Tv (6.3%), sin encontrar diferencias entre IN y Tv. DM también sobreestima la amplitud del contramovimiento respecto a IN (8.6%), no habiéndose registrado esta variable con el método Tv (Tabla 1). La altura del CG y los ángulos del tobillo y la rodilla fueron mayores en el despegue del CMJ que en el aterrizaje (Tabla 2); además, estos ángulos fueron significativamente mayores ($p < 0.05$) en el punto de máxima altura del CG que en el despegue ($151 \pm 12^\circ$, $176 \pm 5^\circ$ y $173 \pm 6^\circ$, respectivamente).

ALTURA DEL SALTO VERTICAL (cm)			AMPLITUD DEL CONTRAMOVIMIENTO (cm)		
DM	IN	Tv	DM	IN	Tv
32.7 ± 7.2	30.2 ± 7.2 ***	30.8 ± 7.5 ***	29.0 ± 6.1	26.7 ± 5.5 ***	

Tabla 1: Altura del salto vertical y amplitud del contramovimiento registrados con las metodologías de diferencia de marcas (DM), integración numérica (IN) y tiempo de vuelo (Tv). Significación estadística de las diferencias con DM: ***= $p < 0.001$. (adaptada de Kibele, 1998).

ALTURA DEL CG (cm)		ÁNGULO DEL TOBILLO ($^\circ$)		ÁNGULO DE LA RODILLA ($^\circ$)		ÁNGULO DE LA CADERA ($^\circ$)	
Despegue	Aterriz.	Despegue	Aterrizaje	Despegue	Aterrizaje	Despegue	Aterrizaje
11.6 ± 2.4	9.4 ± 2.4 **	138 ± 5	129 ± 8 **	172 ± 4	160 ± 5 ***	165 ± 10	164 ± 10

Tabla 2: Altura del CG y ángulos de tobillo, rodilla y cadera durante el despegue y aterrizaje del CMJ (variables calculadas mediante fotogrametría). Significación estadística de las diferencias entre despegue y aterrizaje: **= $p < 0.01$ y ***= $p < 0.001$. (adaptada de Kibele, 1998).

Las mayores alturas de salto registradas por DM respecto a IN son justificadas porque el sujeto despega de la plataforma sin alcanzar la misma extensión que cuando se encuentra en el punto más elevado de la parábola del salto; esto hace que $DM > IN$. Las mayores amplitudes del contramovimiento se cree que son debidas a que el modelo de Dempster no es adecuado para analizar gestos en los que se produce una flexión de tronco (como es el salto vertical en la fase de contramovimiento), ya que considera a éste como un segmento rígido; de tal forma que en la fase isométrica del contramovimiento el tronco se encuentra curvado, y el hombro ocupa una posición relativamente más baja que la descendida por el centro de masas del tronco, por lo cual los valores de amplitud del contramovimiento son mayores en DM que en IN. Para solucionar este problema se puede utilizar otro modelo de CG, como el de Hatze (1980) ó deLeva (1996). Kibele (1998), justifica no haberlos utilizado porque exigen un proceso complejo que consta de una serie de medidas antropométricas preparatorias sobre el sujeto y una posterior transformación de los puntos anatómicos marcados como referencia (a la hora de calcular los segmentos del tronco). Por último, cuando se compara la altura del salto registrada por los métodos IN y Tv no se encuentran diferencias significativas, a pesar de haberse constatado mayores ángulos de despegue que de aterrizaje, lo que teóricamente conllevaría que $Tv > IN$; afirmándose que todos los sujetos menos uno alcanzaron mayor altura de salto según el método de Tv, y que el nivel de significación de las diferencias fue de $p = 0.07$ ($Tv > IN$).

En conclusión, el método de IN es una buena alternativa para calcular la altura del CG en un salto vertical, aunque un uso combinado de IN y Tv podría utilizarse siempre y cuando las diferencias entre ambos no fueran mayores de un 5% (Kibele, 1998).

3.2. Validez y fiabilidad de los métodos para testar el rendimiento en el salto vertical

Hatze (1998), comparó los métodos de DM+IN y Tv (lo denominó como ergómetro de Bosco), aunque su

análisis va más lejos de analizar sólo la altura del salto vertical, pretendiendo comparar también la potencia estimada con ambos métodos. Para ello utilizó a 22 sujetos que realizaron saltos verticales únicos (DJ, n=26) y series de 2 saltos repetidos (RJ, n=40) sobre una plataforma de fuerza (Kistler, modelo 9261, precisión 2000Hz), filmándose lateralmente el salto utilizando una cámara de alta velocidad (250Hz) para su posterior análisis en 2D, e integrando los datos cinemáticos y cinéticos para obtener la variable potencia. El modelo de CG utilizado fue de Hatze (1980), un modelo antropométrico-computacional que sólo necesita el marcaje de 8 puntos anatómicos en el sujeto; las imágenes se digitalizaron mediante un procedimiento de detección automática de marcadores, para lo que fue necesario un software específico.

Los resultados expuestos en la Tabla 3 muestran que las alturas de los saltos verticales únicos (CMJ) fueron mayores con el método Tv que con DM+IN (3.6%), acentuándose para los saltos repetidos ó RJ (7.4%), lo que se justifica por un movimiento de salto más inestable durante los RJ (despegues en extensión y aterrizajes en mayor flexión comparados con los CMJ). Sin embargo estas diferencias no fueron constantes, de manera que presentaron un rango entre 0.4-11.4% para los CMJ y entre 0-19.1% para los RJ. Estos resultados coincidieron con los presentados por Frick y cols. (1991), si bien ellos sólo analizaron los saltos cuyas posiciones de despegue y aterrizaje se apreciaban similares. La potencia sigue un comportamiento diferente, registrándose mayores valores con los métodos DM+IN que con el Tv, tanto para el CMJ (23.8%) como para el RJ (5.1%); ambas con un rango de variación amplio. El ratio Tp/Tc se compara entre CMJ y RJ, siendo claramente menor en el CMJ.

VARIABLE/MÉTODOS	CONTRAMOVIMIENTO (CMJ) n=26		SERIE DE SALTOS REPETIDOS (RJ) n=40	
	DM+IN	Tv	DM+IN	Tv
Altura del salto (cm)	31.3 ± 5.7	32.4 ± 5.8	30.1 ± 5.8	32.2 ± 5.8
Potencia del salto (W/Kg)	26.0 ± 4.0	19.8 ± 2.7	29.7 ± 7.1	28.6 ± 7.2
Ratio Tp/Tc	0.332 ± 0.037		0.538 ± 0.032	

Tabla 3: Altura, potencia y ratio (Tp/Tc) entre el tiempo de propulsión (Tp) y de contacto (Tc) analizados en saltos verticales con contramovimiento (CMJ) y repetidos (RJ). Se comparan las metodologías de diferencia de marcas del CG + integración numérica (DM+IN) y de tiempo de vuelo (Tv).

Las diferencias encontradas entre DM+IN y Tv al analizar los CMJs y RJs son debidas a tres suposiciones de Bosco y cols. (1983), que resultan erróneas, y a partir de las cuales calcularon tanto las alturas como las potencias de los saltos (véase ecuaciones en el apartado 2.1 del artículo "Tests de salto vertical (I): Aspectos funcionales") (Villa y García-López, 2003):

- Que las posiciones de despegue y aterrizaje son idénticas, habiéndose demostrado que no es así según los datos aportados por Kibele (1998), y a partir de los obtenidos en el presente estudio, donde las diferencias en las alturas de salto son mayores.
- Que la velocidad vertical del CG aumenta linealmente durante la fase de propulsión, pudiendo observarse en la Figura 4 que esto no es así, ya que no aumenta de forma lineal y además antes del despegue existe una disminución de la velocidad.
- Que el cociente Tp/Tc siempre es igual a 0.5, cuando en los CMJs es menor (0.332), provocando una disminución de la potencia, ya que se supone que el trabajo de propulsión ha sido producido en la mitad del tiempo de contacto (50%), cuando realmente se ha producido en un 33.2% del mismo. Las menores diferencias en los RJs (5.1% frente a 23.8% en los CMJs) no son tales, ya que oscilan en un rango entre 0.3-14.6%, pero el hecho de tener mayores alturas de salto y cocientes Tp/Tc superiores a 0.5 hace que se amortigüen y la potencia presente valores similares entre DM+IN y Tv.

En conclusión, el método del ergómetro de Bosco (Tv) no es apropiado para evaluar CMJs y RJs, ya que además de presentar un error medio del 5% respecto a DM+IN, ofrece una variabilidad muy alta, lo que cuestiona seriamente su validez y fiabilidad. "Así, el método de ergómetro de salto no se puede considerar fiable para evaluar ciertos aspectos del rendimiento atlético" (Hatze, 1998).

3.3. Metodologías para el análisis del rendimiento en el Drop Jump

Baca (1999), comparó diferentes protocolos de medida de las variables biomecánicas del *Drop Jump* (altura de salto, fases excéntrica y concéntrica, desplazamientos verticales durante dichas fases) para encontrar con qué método se cometen menos errores con respecto a un método de referencia (doble plataforma de fuerza). Si bien hasta ahora los estudios revisados analizaban la batida del salto desde parado, la obtención de variables biomecánicas de un salto que se realiza desde una altura es mucho más compleja, sobre todo para determinar los impulsos de frenado (excéntrico) y aceleración (concéntrico) durante la fase de apoyo tras la caída. El *Drop Jump* (DJ) también ha formado parte de multitud de investigaciones sobre utilización de energía elástica en el salto de hombres y mujeres (Komi y Bosco, 1978), la altura óptima de caída para el entrenamiento pliométrico (Lees y Fahmi, 1994), etc., por lo que se necesita contrastar los diferentes procedimientos de análisis del DJ para determinar cuáles son los más precisos.

Para ello se utilizaron 5 sujetos que realizaron 5 DJ como los que se ilustran en la Figura 9a sobre dos plataformas de fuerza Kistler (modelos 9281B y 9261A, sincronizadas para una precisión de 1000Hz). Simultáneamente, los saltos eran filmados con una cámara de alta velocidad a 250Hz, para calcular la posición del CG en el tiempo utilizando el modelo de Hatze (1980), y los 11 puntos anatómicos que se ilustran. Una curva fuerza-tiempo característica del DJ se ilustra en la Figura 9b, donde se identifican los instantes más relevantes del salto (t). Las variables biomecánicas fueron analizadas combinando los datos de la plataforma de fuerza y de fotogrametría, dando como resultado un total de 8 técnicas (ver ecuaciones del apartado 2):

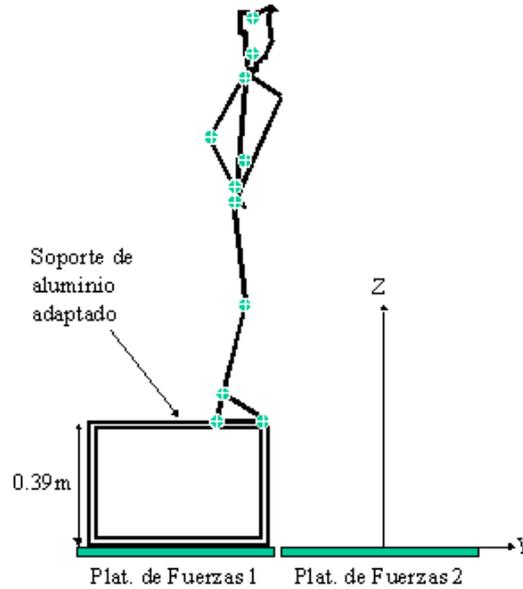


Figura 9a: Diseño experimental y posición de los marcadores colocados sobre el sujeto.

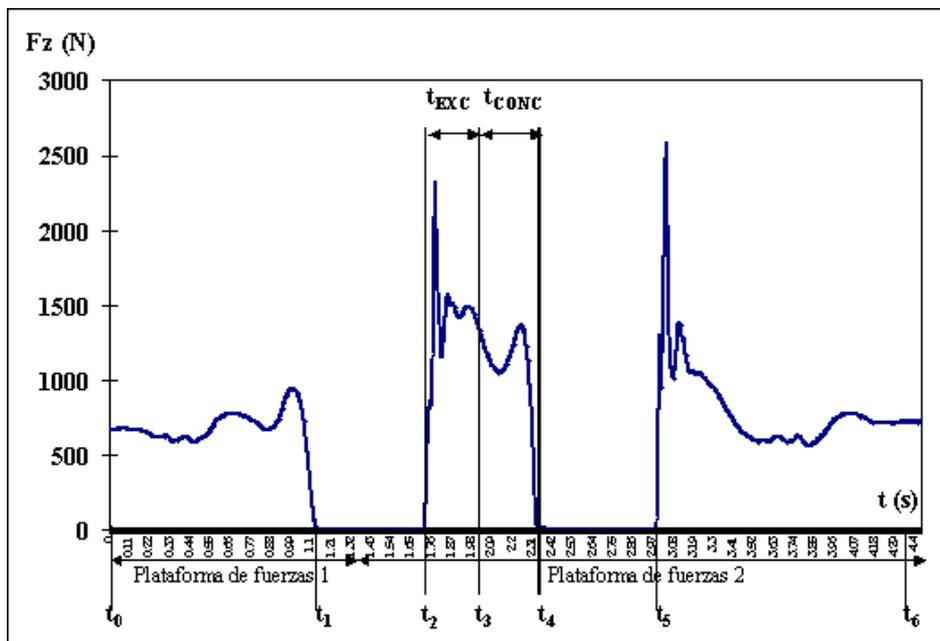


Figura 9b: Curva fuerza-tiempo característica del DJ: t0= sujeto parado encima de la plataforma 1; t1= instante de despegue de la plataforma 1; t2= aterrizaje en la plataforma 2; t3= la velocidad vertical del CG es cero; t4= despegue de la plataforma 2; t5= aterrizaje en la plataforma 2 después del salto; t6= se determina visualmente cuándo el sujeto se encuentra parado encima de la plataforma 2. tEXC= duración de la fase excéntrica; tCONC= duración de la fase concéntrica.

1. Doble plataforma de fuerza (método A, ó método de referencia): La velocidad de llegada a la plataforma 2 (V_L) se obtiene sumando la velocidad teórica del CG en caída libre con la velocidad vertical de despegue de la plataforma 1; a partir de ésta se obtiene la altura real de caída del DJ (h_{DROP}). La velocidad de despegue de la plataforma 2 (V_{zd}), que determinará la altura de salto (h_{JUMP}), se obtiene sumando V_L a la velocidad de la batida calculada por el método de integración numérica (V_z). A partir de V_L y V_z también se calcularán los desplazamientos verticales del CG en las fases excéntrica (ΔZ_{EXC}) y concéntrica (ΔZ_{CONC}), así como los tiempos de cada fase (t_{EXC} y t_{CONC} , respectivamente).

2. Una plataforma de fuerza (método B): VL se calcula a partir de la integración numérica desde t_2 hasta t_6 (según la ley de conservación del impulso, el impulso entre t_2 y t_4 menos el impulso entre t_5 y t_6 ha sido generado entre t_0 y t_1). El resto de variables se calculan igual que en el método A.
3. Energía potencial (método C): VL se calcula a partir de la altura de caída del DJ (0.39m), el resto de variables se calculan igual que en el método A.
4. Tiempo de vuelo ó T_v (método D): V_{zd} se calcula a partir del tiempo registrado entre t_4 y t_5 . No se obtienen el resto de variables.
5. Posiciones analizadas en vídeo (método E): Este método sólo utiliza fotogrametría, por lo que VL, h_{DROP} , t_{EXC} , t_{CONC} , ΔZ_{EXC} , ΔZ_{CONC} , V_{zd} y h_{JUMP} son calculadas a partir de los datos del vídeo. VL se consideró la máxima velocidad vertical de la caída, h_{DROP} se obtuvo a partir de VL, t_{EXC} y t_{CONC} se tomaron desde el apoyo de los metatarsos en la plataforma en la plataforma 1 hasta el punto más bajo del CG y desde ese punto hasta el despegue de los metatarsos de la misma plataforma, respectivamente, el mismo procedimiento se utilizó para calcular ΔZ_{EXC} y ΔZ_{CONC} ; finalmente V_{zd} se consideró como la máxima velocidad durante el despegue y h_{JUMP} se estimó a partir de ella.
6. Posiciones y velocidades en vídeo (método F): Con este método sólo se calcularon VL y V_{zd} , pero no con los datos de velocidades obtenidas fotograma a fotograma en el vídeo, sino a partir de las derivadas de los datos de posición del CG en el tiempo.
7. Posiciones analizadas en vídeo más datos de fuerza (método G): t_2 y t_4 (aterrizaje y despegue en la plataforma 1, respectivamente) se determinaron con los datos de fuerza, pero t_3 se determinó con los datos de vídeo, a partir de la posición más baja del CG, de manera que t_{EXC} y t_{CONC} se calcularon a partir de los 3 tiempos anteriores. h_{DROP} y h_{JUMP} se determinaron a partir de los datos de vídeo, y derivadas de ellas se obtuvieron VL y V_{zd} . ΔZ_{EXC} y ΔZ_{CONC} se calcularon con los datos del vídeo en los instantes t_2 , t_3 y t_4 .
8. Momento de velocidad cero (método H): Es otra combinación de los datos de vídeo y fuerza; t_2 , t_3 y t_4 se calculan como en el método anterior, por lo que t_{EXC} y t_{CONC} son calculadas a partir de ellos; pero VL y V_{zd} se obtienen mediante la integración numérica de la curva fuerza-tiempo antes y después de t_3 , respectivamente (instante de velocidad cero), y los desplazamientos verticales del CG (ΔZ_{EXC} y ΔZ_{CONC}) también se calcularon a partir de los datos de fuerza.

Todos los métodos citados se compararon con el método de referencia (A) para las variables descritas. Aunque el método de una plataforma de fuerza (B) se ajustó bastante al método A, sobreestimó h_{DROP} , alargando t_{EXC} y acortando t_{CONC} . El peor método fue el de momento de velocidad cero (H), por la dificultad de determinar t_3 en base a los datos de vídeo. Los métodos que menos difirieron del método A fueron los de posiciones analizadas en vídeo (E) y las posiciones de vídeo más datos de fuerza (G), aunque las diferencias encontradas con aquél se justifican por la dificultad de colocar el marcador en el tronco que exige el modelo de Hatze (1980). Según Baca (1999), es mejor trabajar con los datos directos de las posiciones del CG que con datos derivados, por lo que las velocidades estimadas con el método F (VL y V_{zd}) difirieron respecto a E y G. Si h_{JUMP} se calcula a partir del tiempo de vuelo (método D) se sobreestimaré V_{zd} ; esta sobreestimación resultó individual para cada sujeto, por lo que el método sería bueno para estimar sólo los ensayos intrasujeto. El método de energía potencial (C) subestima VL, puesto que el sujeto eleva la pierna antes de dejarse caer, y eso conlleva una mayor h_{DROP} y una mayor VL; con el método de integración numérica, si se subestima VL se sobreestima V_{zd} y h_{JUMP} .

En conclusión, los métodos de vídeo (E) y los de plataformas de fuerza y vídeo (G) son una buena alternativa al método de referencia (A) para el análisis de las variables biomecánicas del DJ. Si sólo se dispone de una plataforma de fuerza el mejor método sería el G, determinando los instantes de despegue y caída en base a los datos de fuerza. El método de tiempo de vuelo (D) sólo se aconseja para estimar la altura de salto del DJ cuando no se dispone de vídeo ni de dos plataformas y se quiere comparar a una misma persona. Los métodos de energía potencial (C), velocidad cero (H) y posiciones y velocidades de vídeo (F) no son recomendables para analizar el DJ (Baca, 1999).

3.4. Identificación de factores cinéticos y temporales de la curva fuerza-tiempo relacionados con el rendimiento en el salto verticalmente

Dowling y Vamos (1993), utilizan como única metodología para el análisis del salto vertical la IN, pero responden a la pregunta de qué variables de la curva fuerza-tiempo del salto se relacionan con el criterio de eficacia del mismo (la altura del salto vertical). Este tipo de estudios contribuyen a la identificación de las variables cinéticas que se relacionan con una buena técnica de salto vertical, lo que posteriormente puede estudiarse conjuntamente con otras variables electromiográficas (secuencia de activación de los grupos musculares implicados en el salto) y cinemáticas (velocidades angulares máximas de las articulaciones y su secuenciación) para el diseño de modelos optimizados de salto vertical a partir de simulaciones por ordenador (Bobbert, 2002).

Se evaluaron a 97 sujetos durante la realización de un salto vertical con brazos libres en una plataforma de fuerza (AMTI, modelo OR6-5, precisión de 100Hz), analizando 11 variables cinéticas y temporales de la curva fuerza-tiempo (Figura 10), además de la pendiente media de la fuerza (p), el factor de forma (q) o cociente

entre el área de impulso real (impulso positivo) y el área de impulso máximo posible para el valor de máxima fuerza (delimitada por la línea discontinua), el cociente entre el impulso negativo y positivo (r) y la velocidad máxima negativa (s). Por el método de IN también se calcularon la velocidad vertical de despegue del CG (Vzd) y la altura del salto (ΔH). La combinación de los valores de fuerza y la velocidad vertical del CG en la batida (Vz) dio lugar a 4 variables más: potencia máxima negativa (l), potencia máxima positiva (n), duración de la fase de potencia positiva (M) y duración de la potencia máxima positiva hasta el despegue (O). Los valores de fuerza, impulso y potencia fueron normalizados al peso corporal de los sujetos.

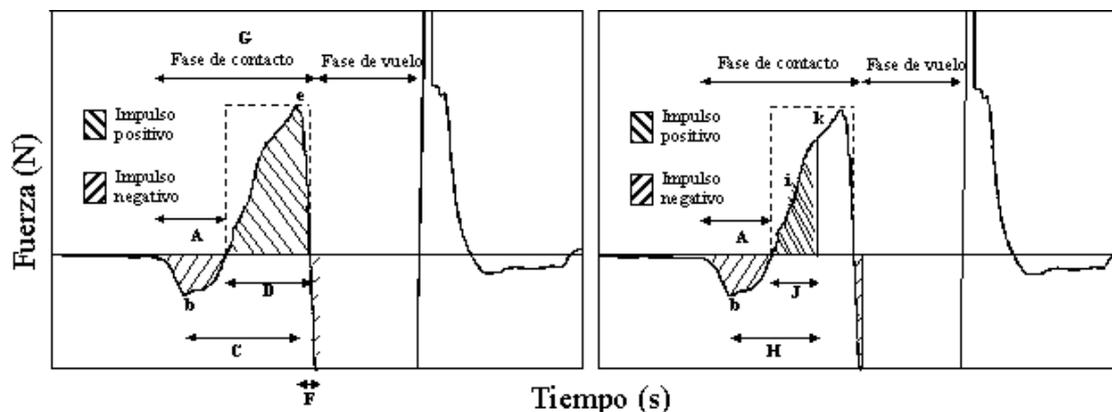


Figura 10: Variables cinéticas y temporales medidas en la curva fuerza-tiempo de la batida de un salto vertical. A= duración del impulso negativo; b= mínima fuerza; C= duración de la mínima a la máxima fuerza; D= duración del impulso positivo; e= máxima fuerza; F= duración de la máxima fuerza hasta el despegue; G= duración de la fase de contacto; H= duración de la mínima fuerza hasta el punto más bajo del contramovimiento; i= pendiente máxima de fuerza; J= duración de la velocidad máxima negativa hasta el punto más bajo del contramovimiento; k= fuerza en el punto más bajo del contramovimiento.

Las correlaciones entre las 19 variables descritas para cada curva fuerza-tiempo y la altura de los 97 saltos se muestran en la Tabla 4. La única variable a partir de la cual se puede predecir la altura de salto es la potencia máxima positiva (n), con un error no superior a los 2.9 cm, lo que coincide con los estudios de Harman y colaboradores, llevados a cabo en 1990. Debido a las débiles correlaciones del resto de variables se llevó a cabo un análisis de regresión múltiple excluyendo la potencia, y aunque se mejoraron las correlaciones al combinar las variables e-M y D-e-J, no se llegó a la capacidad de predicción de la potencia máxima positiva, encontrando errores mayores de 4.8 cm.

Variable	Descripción	r
"A"	Duración del impulso negativo	0.101
"b"	Mínima fuerza	-0.103
"C"	Duración de la mínima a la máxima fuerza	0.164
"D"	Duración del impulso positivo	-0.055
"e"	Máxima fuerza	0.519 *
"F"	Duración de la máxima fuerza hasta el despegue	-0.274 *
"G"	Duración de la fase de contacto	-0.062
"H"	Duración de la mínima fuerza hasta el punto más bajo del contramovimiento	-0.068
"i"	Pendiente máxima de fuerza	0.138
"J"	Duración de la velocidad máxima negativa hasta el punto más bajo del contramovimiento	-0.026
"k"	Fuerza en el punto más bajo del contramovimiento	0.173
"l"	Potencia máxima negativa	-0.298 *
"M"	Duración de la fase de potencia positiva	-0.010
"n"	Potencia máxima positiva	0.928 *
"O"	Duración de la potencia máxima positiva hasta el despegue	-0.406 *
"p"	Pendiente media de la fuerza	0.027
"q"	Factor de forma	-0.111
"r"	Cociente entre el impulso negativo y positivo	-0.514 *
"s"	Velocidad máxima negativa	-0.295 *

Tabla 4: Descripción y coeficientes de correlación (r) de las 19 variables independientes obtenidas de la curva fuerza-tiempo con la altura de los saltos verticales ($n=97$). Nivel de significación estadística (en negrita) de las correlaciones: * = $p<0.01$.

Otra estrategia utilizada en su análisis fue comparar los 5 mejores y los 5 peores saltos, observándose una gran variabilidad en todos ellos. En principio, parecía que los peores saltos presentaban un doble pico de fuerza en la fase de impulso positivo, por lo que se determinó que 54 de los 97 saltos tenían un solo pico, y fueron comparados con los de doble pico. No se encontraron diferencias significativas en la altura de salto de los dos subgrupos. Estos resultados coinciden con los obtenidos recientemente en nuestro laboratorio para el análisis del salto horizontal (García-López y cols., 2004), pero contrastan con la opinión de algunos autores que estudiando el salto horizontal han asociado el doble pico de fuerza vertical con una mala técnica (Aguado

e Izquierdo, 1995; Aguado y cols., 2000), sin que esto se hubiera demostrado en sus investigaciones o en algunas de las referencias de sus artículos. Para Dowling y Vamos (1993), tras revisar otros trabajos, el doble pico sería debido al balanceo de los brazos durante el salto en combinación con la aceleración del tronco, lo que coincide con nuestros estudios (García-López y cols., 2004). Otra cuestión a plantear sería si el balanceo de brazos es bien o mal aprovechado, por lo que se encuentran buenos y malos saltos con dobles picos.

Para Dowling y Vamos (1993), la revisión de diferentes trabajos que asocian distintas manifestaciones de la fuerza muscular (máxima isométrica, máxima isocinética, máxima isoinercial, etc.) valorada con distintos ergómetros (isocinéticos, plataformas de fuerza, etc.) con la altura del salto vertical, muestran que ninguna de las manifestaciones estudiadas son buenas predictoras del rendimiento en salto, aunque existen relaciones positivas con el mismo en forma de tendencias. La mayor relación encontrada fue entre la potencia isocinética pico en extensión de rodillas y el salto vertical ($r=0.88$), menor que la obtenida en el presente estudio. Lo que parece claro es que más importante que los valores de fuerza o impulso en el salto vertical es el ritmo de producción de fuerza o impulso, la combinación entre fuerza y velocidad, que es la propia definición de "explosividad".

Por último, relacionado con la simulación por ordenador y optimización del salto vertical en base a parámetros cinéticos, parece poco probable que las variables analizadas puedan servir por sí solas para llevar a cabo esta tarea, ya que las relaciones han sido bajas y la variabilidad entre sujetos alta. Dowling y Vamos (1993), lo justifican por la elevada complejidad del sistema músculo-esquelético humano y la variabilidad en los rendimientos individuales del salto vertical hacen de la curva fuerza-tiempo una herramienta de diagnóstico bastante débil.

4) SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE FUTURO DE LAS METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DEL SALTO VERTICAL: A MODO DE CONCLUSIÓN

Los estudios referidos se caracterizan por su grado de especificidad referente a las metodologías de cálculo de la altura del salto vertical, siendo publicados en revistas especializadas del más alto impacto en investigación biomecánica (*Journal of Applied Biomechanics* y *Medicine and Science in Sports and Exercise*). No obstante, los propios autores enuncian una serie de aspectos mejorables para futuras investigaciones sobre las metodologías citadas.

En primer lugar, y referente a la metodología de diferencia de marcas del CG, Kibele (1998), ha apuntado las limitaciones del modelo de CG de Dempster (1955), para calcular los recorridos y velocidades excéntricas y concéntricas durante el contramovimiento. Este aspecto ha sido mejorado por Hatze (1998), y Baca (1999), quienes utilizan el modelo matemático-computacional de Hatze (1980). Se echa de menos en todos estos artículos el uso de fotogrametría 3D para obtener el desplazamiento real del CG, ya que esto permitiría utilizar modelos más actuales como el de DeLeva (1996), dividiendo el tronco en 3 segmentos; además, el modelo de Hatze (1980), presupone que el salto vertical es un gesto simétrico de hemicuerpo izquierdo y derecho, pudiendo esto alterarse en un salto vertical, y especialmente en el *Drop Jump*, cuando se eleva y adelanta uno de los pies para comenzar la caída. Por todo lo comentado, y aunque el diseño metodológico sea más complejo, aconsejamos realizar futuros estudios en 3D con modelos de CG diferentes y actualizados.

En segundo lugar, cuando Hatze (1998) utiliza el tiempo de vuelo para estimar la altura de salto, se refiere constantemente al ergómetro de salto, que asemeja al ergómetro de Bosco (Bosco y cols., 1983). Esto no es del todo cierto, puesto que el tiempo de vuelo ha sido medido con plataforma de fuerza y no con plataforma de contacto, por lo que pensamos que las diferencias entre las metodologías de integración numérica (IN) + diferencia de marcas del CG (DM) con el tiempo de vuelo (T_v) han sido distintas a si se hubiera utilizado realmente el ergómetro de Bosco. Kibele (1998), ha seguido los mismos criterios que Hatze (1998), y también por ello pudiera no haber encontrado diferencias significativas entre el método IN y T_v . Futuros estudios debieran comprobar si el ergómetro de Bosco es válido para medir la altura de salto, comparándolo con el método considerado de referencia (IN).

Haciendo referencia a la relación entre las variables cinemáticas y cinéticas de la curva fuerza-tiempo y el rendimiento en el salto vertical, Dowling y Vamos (1993), reconocen la necesidad de utilizar mayor número de sujetos ($n>97$) para poder realizar correlaciones multivariante que pudieran ser mejores predictoras del rendimiento que la potencia máxima concéntrica. Si a esto añadimos, basándonos en las opiniones de Kibele (1998), Hatze (1998) y Baca (1999), que la baja frecuencia de muestreo de la plataforma de fuerza utilizada en este estudio (100Hz) pudiera haber distorsionado la variable velocidad vertical de despeque del CG (V_{zd}), en futuras investigaciones se deberían analizar estas mismas relaciones utilizando muchos más sujetos y plataformas de fuerza con mayor precisión (unos 1000Hz).

En conclusión, se han explicado y discutido a nivel teórico las diferentes metodologías que pueden emplearse para medir la altura del salto vertical. En líneas generales, el método de integración numérica (IN) puede ser considerado como el más válido o de referencia, por encima incluso del análisis fotogramétrico bidimensional del desplazamiento del centro de gravedad (CG). Futuros trabajos deberían contrastar si el análisis videográfico tridimensional, mediante el empleo de los modelos de CG adecuados, puede ser considerado como un método de referencia. Con el método IN, la utilización de una sola plataforma de fuerza va a ser eficaz en la valoración de las modalidades de salto sin contramovimiento (SJ) y con contramovimiento (CMJ y ABK). Sin embargo, cuando pretenden analizarse las modalidades de salto

pliométrico (DJ) o series de saltos repetidos (RJ), debieran utilizarse dos plataformas de fuerza o la combinación de plataformas de fuerza y vídeo, respectivamente. Algo similar ocurre cuando se valora la altura del salto en función del tiempo de vuelo (Tv), ya que mientras Kibele (1998) no encuentra diferencias entre IN y Tv durante la realización de CMJs, Hatze (1998), critica duramente esta metodología, que puede llegar a introducir errores mayores del 5% durante la realización del RJ. Por lo tanto, cuando se utiliza Tv deberían tenerse en cuenta: a-controlar estrictamente las posiciones de despegue y aterrizaje de la plataforma de contacto; b-comprobar que los modelos de plataformas de contacto están validados para medir el tiempo de vuelo; c-conocer que la fiabilidad es mayor para los saltos SJ, CMJ y ABK que para los saltos DJ y RJ; d-emplazar esta metodología principalmente para la valoración intrasujeto; por ejemplo, para valorar los efectos en el salto vertical de un programa de entrenamiento. En relación a la cinética de la batida del salto vertical, sólo la potencia mecánica relativa al peso corporal, valorada mediante IN, permitirá predecir el con cierta exactitud el rendimiento en el salto. El resto de variables dependen de la técnica individual de salto de cada sujeto. Es necesario pues, interpretar las variables cinéticas del salto con cierta cautela, para intentar la no formulación de conclusiones erróneas.

5) BIBLIOGRAFÍA

- AFR (2002).** AFR System. *AFR Technology*. <<http://personal.redestb.es/afrtechnology/afr.htm>> [Consulta: 17/06/02].
- Aguado, X.; Izquierdo, M. (1995).** La detente horizontal. Estudio cinemático y cinético de 64 casos en las pruebas de ingreso en el I.N.E.F. de León. *Archivos de Medicina del Deporte*, 12 (46): 93-104.
- Aguado, X.; Grande, I.; Izquierdo, M.; López, J.L.; Mendoza, F.; Meana, M. (2000).** Estudio biomecánico de la batida en el salto horizontal a pies juntos desde parado. Cinética de saltos máximos y submáximos. *Archivos de Medicina del Deporte*, 17 (76): 109-116.
- Alixanov, I.I.; Alixanova, L.I. (1987).** Compteur chronometre utilise lors des experiences et des recherches en sport. *Teor.Prakt. Fiz. Kult.*, 7: 48-51.
- Baca, A. (1999).** A comparison of methods for analyzing drop jump performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31 (3): 437-442.
- Bobbert, M.F. (2002).** *The effect of coordination on vertical jumping performance*. En Gianikellis, K. *Scientific proceedings of the XXth International Symposium on biomechanics in sports*. Ed. Universidad de Extremadura. Cáceres: 355-361.
- Bosco C.; Luhtanen P.; Komi P.V. (1983).** A simple method for measurement of mechanical power in Jumping. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 50 (2): 273-282.
- Clauser, C.E.; McConville, J.T.; Young, J.W. (1969).** *Weight, volume and center of mass of segments of the human body*. Información técnica AMRL. Base aérea de Wright-Patterson. Ohio: 69-70.
- Dal Monte, A. (1983).** La valutazione funzionale dell'atleta. Ed. Sansoni, Firenze.
- deLeva, P. (1996).** Adjustments to Zatsiorsky-Seluyanov's segment inertia parameters. *J. Biomech.*, 29: 1223-1230.
- Dempster, W.T. (1955).** *Space Requirements of the seated operator*. Documentación técnica WADC. Ed. Base aérea de Wright-Patterson. Ohio: 55-159.
- Dowling, J.J.; Vamos, L. (1993).** Identification of kinetic and temporal factors related to vertical jump performance. *J. Appl. Biomech.*, 9: 95-110.
- Frick, U.; Schmidtbleicher, D.; Wörn, C. (1991).** Comparison of biomechanical methods for determining the height of vertical jumps. *Leistungssport.*, 2: 48-53.
- García-López, J.; Rodríguez, J.A.; Morante, J.C.; Villa, J.G. (1999).** Comparación de saltos verticales realizados según las metodologías de Bosco y Sargent. *Archivos de Medicina del Deporte*, 16 (Sup. esp.): 553.
- García-López, J.; Herrero, J.A.; García, D.; Rubio, I.; Rodríguez, J.A. (2004).** *Estudio cinético de la batida del salto horizontal: tópicos y consideraciones*. En CD de actas del III Congreso de la Asociación Española de Ciencias del Deporte. Ed. Facultat de Ciències de l'Activitat Física i l'Esport. Valencia.
- González, J.L. (1996).** *Alternativa instrumental al test repeat jump de Bosco: El pulsador plantar perfeccionado*. Tesina de Licenciatura. Universidad de León.
- Gusi, N.; Marina, M.; Nogués, J.; Valenzuela, A.; Naser, S.; Rodríguez, F.A. (1997).** Validez comparativa y fiabilidad de dos métodos para la valoración de la fuerza de salto vertical. *Apunts*, 32: 271-278.
- Gutiérrez, M. (1999).** *Biomecánica deportiva*. Ed. Síntesis. Madrid.
- Hatze, H. (1980).** A mathematical model for the computational determination of parameter values of anthropomorphic segments. *J. Biomech.*, 13: 833-843.
- Hatze, H. (1998).** Validity and reliability of methods for testing vertical jumping performance. *J. Appl. Biomech.*, 14: 127-140.
- Hay, J.G. (1988).** *The biomechanics of sport techniques*. Ed. Prentice-Hall. New Jersey.
- Hochmuth, G. (1973).** *Biomecánica de los movimientos deportivos*. Ed. INEF de Madrid. Madrid.
- Hornbeck, R.W. (1967).** *Numerical methods*. Ed. Prentice Hall. New York.
- Kibele, A. (1998).** Possibilities and limitatios in the biomechanical analysis of countermovement jumps: a

methodological study. *J. Appl. Biomech.*, 14: 105-117.

Komi, P.V.; Bosco, C. (1978). Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 10 (4): 261-265.

Lees, A.; Fahmi, E. (1994). Optimal drop heights for plyometric training. *Ergonomics*, 37 (1): 141-148.

Luthanen, P. (1984). Evaluación física de los jugadores de fútbol. *Apunts*, 21 (82): 99-102.

Macdonald, C.; Dapena, J. (1991). Linear kinematics of the men's 110-m and women's 100-m hurdles races. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 23 (12): 1382-1391.

Martín, R. (1987). La fuerza relativa (Fr). *Revista de Entrenamiento Deportivo (RED)*, 1 (4-5): 70-79.

Mauriz, J.L.; Taberner, B.; García-López, J.; Jorquera, F.; Villa, J.G.; González, J. (2000). Physical exercise and improvement of liver oxidative metabolism in the elderly. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 81 (3): 62-66.

Mijares, H.; Torres, S.H.; Alonso-Hernández, J.; Hernandez, N.; Garmendia, J. (1995). La composición fibrilar y las pruebas de Wingate y el ergosalto en atletas. *Archivos de Medicina del Deporte*, 12 (45): 17-21.

Petrov, B.C.; Zujev, V.N. (1987). Le "graviton", un appareil destine a mesurer l' aptitude a sauter des athletes et a determiner leurs caracteristiques de vitesse-force. *Teor.Prakt. Fiz. Kult.*, 9: 54-55.

Psion Organiser II (1996). *Manual de instrucciones.* Editorial Mac. Graph. Barcelona.

Rodano, R. (2002). *Critical issues in applied sport biomechanics research.* En Gianikellis, K. *Scientific proceedings of the XXth International Symposium on biomechanics in sports.* Ed. Universidad de Extremadura. Cáceres: 243-249.

Sargent, D.A. (1921). Physical test of man. *Am. Phys. de. Rev.*, 26: 188.

Schmidtbleicher, D. (1992). *Training for power events.* En Komi, P.V. *Strength and power in sport.* Ed. Blackwel Scientific. London: 381-395.

Sébert, P.; Barthelemy, L.; Dietman, Y.; Douguet, C.; Boulay, J. (1990). A simple device for measuring a vertical jump: description and results. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 61 (3-4): 271-273.

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 inédita. Universidad de Granada.

Viitasalo, J.T.; Kyroelainen, H.; Bosco, C.; Alen, M. (1987). Effects of rapid weight reduction on force production and vertical jumping height. *Int. J. Sports Med.*, 8 (4): 281-285.

Viitasalo, J.T.; Luhtanen, P.; Monone, H.V.; Norvapalo, K.; Paavolainen, L.; Salonen, M. (1997). Photocell contact mat; a new instrument to measure contact and flight times in running. *J. Appl. Biomech.*, 13 (2): 254-266.

Villa, J.G.; García-López, J. (2003). Tests de salto vertical (I): Aspectos funcionales. *RendimientoDeportivo.com*, N°6. <<http://www.RendimientoDeportivo.com/N006/Artic029.htm>> [Consulta 12/01/04].

Villa, J.G.; García-López, J.; Morante, J.C.; Moreno, C. (1999). Perfil de fuerza explosiva y velocidad en futbolistas profesionales y amateurs. *Archivos de Medicina del Deporte*, 16 (72): 315-324.

Vittori, C. (1990). El entrenamiento de la fuerza para el sprint. *Revista de Entrenamiento Deportivo (RED)*, 4 (3): 2-8.

Yeadon, M.R. (1990). The simulation of aerial movement-II. A mathematical inertia model of the human body. *J. Biomech.*, 23 (1): 67-74.

Zatsiorsky, V.M.; Seluyanov, V.N. (1985). *Estimation of the mass and inertia characteristics of the human body by means of the best predictive regressions equations.* En Winter, D. y cols. *Biomechanics IX-B.* Ed. Human Kinetics Publishers. Champaign, Illinois: 233-239.

Imprimir

RendimientoDeportivo.com
Revista Digital

Depósito Legal: LE-1832-01

ISSN: 1578-7354