



UNIVERSITAT DE  
BARCELONA

# La variabilidad de movimiento en la carrera batida de remate en jugadoras de voleibol de distintas categorías

## Movement variability in volleyball spike in female players of different categories

Jordi Català Antúnez

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) i a través del Dipòsit Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

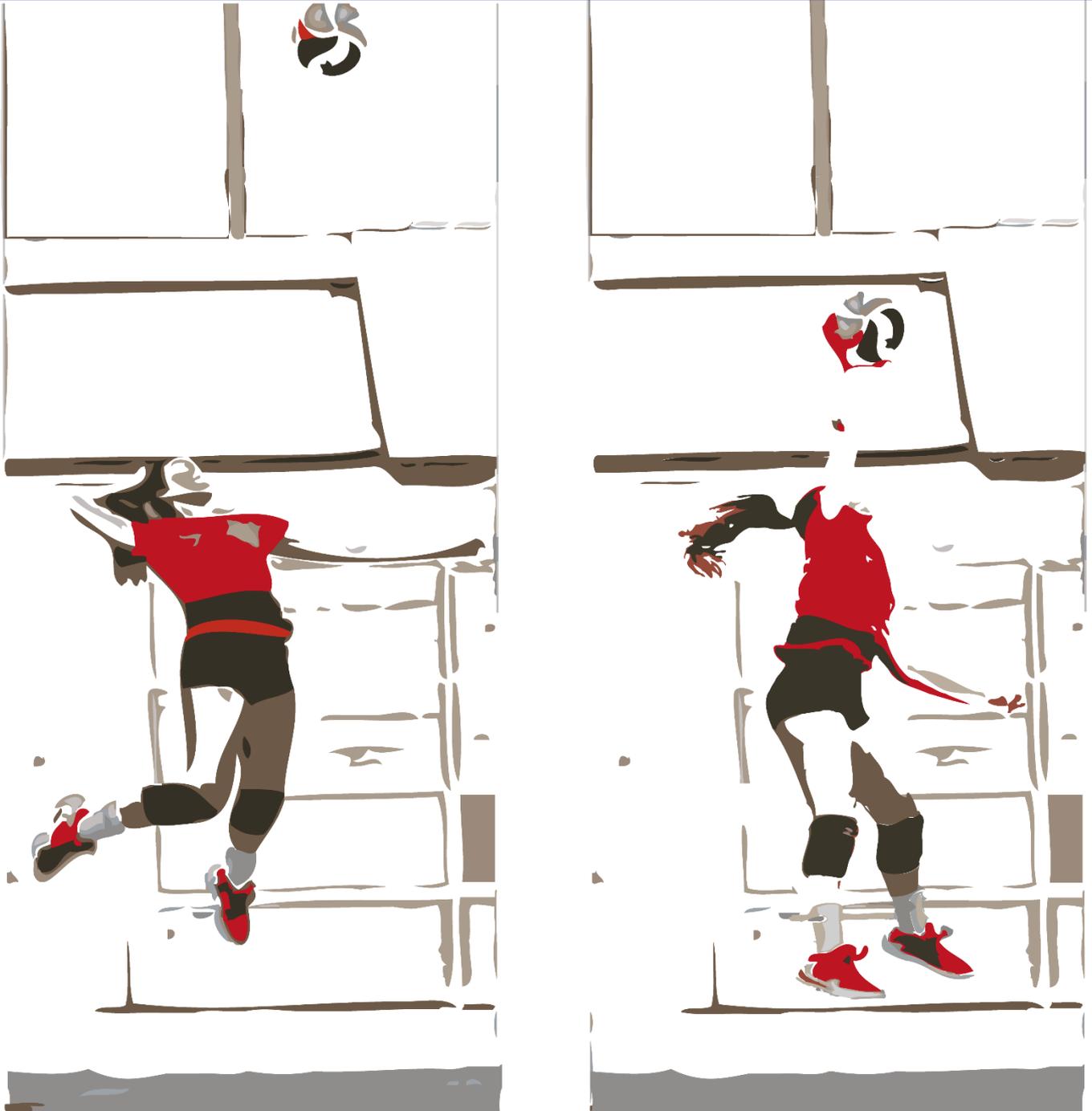
**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) y a través del Repositorio Digital de la UB ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) service and by the UB Digital Repository ([diposit.ub.edu](http://diposit.ub.edu)) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

Tesis Doctoral

# LA VARIABILIDAD DE MOVIMIENTO EN LA CARRERA BATIDA DE REMATE EN JUGADORAS DE VOLEIBOL DE DISTINTAS CATEGORÍAS

MOVEMENT VARIABILITY IN VOLLEYBALL SPIKE IN FEMALE PLAYERS  
OF DIFFERENT CATEGORIES









UNIVERSIDAD DE BARCELONA

Facultad de Educación

---

INSTITUTO NACIONAL DE EDUCACIÓN FÍSICA DE CATALUÑA

Centro de Barcelona

Programa de Doctorado

Activitat Física, Educació Física i Esport

**LA VARIABILIDAD DE MOVIMIENTO EN LA CARRERA BATIDA DE REMATE  
EN JUGADORAS DE VOLEIBOL DE DISTINTAS CATEGORÍAS**

**MOVEMENT VARIABILITY IN VOLLEYBALL SPIKE IN FEMALE PLAYERS OF  
DIFFERENT CATEGORIES**

Tesis doctoral presentada por:

Jordi Català Antúnez

Dirigida por:

Dr. Gerard Moras Feliu

Tutorizada por:

Dr. Gerard Moras Feliu

Para optar al título de:

Doctor por la Universidad de Barcelona

Barcelona, 2021



# AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dedicar mi primer agradecimiento a todas las jugadoras que han participado como muestra en los estudios de esta tesis, por colaborar en ellos con esfuerzo y desempeño, mostrando grandes dosis de paciencia y una gran inquietud por contribuir al crecimiento del deporte desde la investigación científica.

A mi director, tutor de tesis y compañero día a día en el INEFC Barcelona **Gerard Moras Feliu**, por mostrarme el camino de la investigación, por motivarme y por acompañarme en el proceso de elaboración de la tesis doctoral. Por entender siempre el momento personal y profesional en el que me encontraba y ofrecerme lo que necesitaba con cercanía y rigor, escuchándome y aportando nuevos conocimientos y puntos de vista sobre todas las ideas y propuestas que iban surgiendo. En mi etapa de estudiante fue uno de mis referentes como profesor y, después de 10 años a su lado y 6 años realizando la tesis doctoral, tengo la oportunidad de seguir aprendiendo de él y con él, estableciendo una relación que perdurará en lo personal y en lo profesional.

A mis padres **Ignacio Helecto** y **Assumpta**, porque vuestro amor por mí me ha permitido vivir todas las etapas de la vida con cercanía y cooperación. Por estar siempre dispuestos a ayudarme en lo necesario de forma incondicional y mostrándome, con vuestro ejemplo personal de pasión por aprender sobre cualquier tema, que razón y corazón son compatibles y necesarios.

A **Ignasi** y **Albert**, mis hermanos mayores, por no dudar ni un instante que lograré lo que me proponga y por vivir con naturalidad y normalidad que consiga mis metas. Vuestra forma de mirarme y acompañarme me ha mostrado el camino para ser yo mismo en todo lo que hago.

A mi complemento **Tamara**, el amor de mi vida. Tu sinceridad, tu amor, tu autoexigencia y tu valentía nos han unido en este camino de descubrimiento continuo. Gracias por ayudarme a instaurar el cambio como hábito en mi vida y por señalarme otros aspectos de ella que me permiten ampliar mi visión sobre las cosas. Tu profundidad y tu alegría me contagian las ganas de saber más sobre todo lo nuevo y me empujan a ser más positivo. Tu rigor y dedicación me ayudan cada día a mejorar lo que hago y cómo lo hago. Sin tu apoyo en este proceso, mi tesis doctoral seguiría siendo un proyecto pendiente de terminar.

A **Sammy**, por sacarme de casa cuando lo necesitaba, por cuidar de mí y por mostrarme la importancia de cuidarse a uno mismo y a los que nos rodean. Tu ejemplo y tu cariño me han ayudado siempre a reconocer aquello que es realmente importante.

A mis suegros **Amparín y Costa**, por su cariño y amor, siendo un ejemplo de esfuerzo diario, superación y amor por el trabajo bien hecho, con rigor y calidad.

A **Erik Roqueta**, porque nuestros caminos se cruzaron como compañeros de clase en la universidad y nuestra amistad sigue creciendo con nuestro progreso profesional. Tu ejemplo de entusiasmo y tu energía positiva siempre me han motivado a mejorar en todo.

A **Toni Gil**, por compartir conmigo tu pasión y tu amor por las cosas bien hechas, con serenidad y respeto. Tu lucha y tu capacidad de superación siempre han sido un ejemplo para mí.

A **Carles Domènech, Mateo Ballester y Joan Llopis**, mis amigos de la infancia de Cocentaina, por compartir nuestros sueños y nuestros primeros pasos en la vida, por apoyarnos en los momentos complicados de la adolescencia y por aprender juntos a ser siempre felices y agradecidos.

A **Jairo Vázquez**, por mostrarme el camino del rigor, del esfuerzo, del trabajo incansable y de la humildad para forjar una amistad, en tiempos de tesis, que perdurará pese a la distancia.

A **Bruno Fernández-Valdés y José Gisbert**, que siempre me habéis apoyado desde el grupo de investigación, donde hemos podido compartir los avances en el apasionante camino del análisis de la variabilidad de movimiento.

A **Marcel·lí Massafret, Joan Solé, Gabi Daza, Manolo Montoya, Michel Marina, Xavi Iglesias, Xesco Espar, Pep Segura, Carles Ventura y Marc Vives**, por ser los profesores que me formaron en mi etapa de estudiante y que me han guiado en mi etapa como profesor, apoyándome también con gran energía y positividad en mi etapa de doctorando.

A **Domingo García**, por ser el primer profesor que vio en mí el potencial investigador y me animó a perseguir mis sueños, me apoyó y me guió para fundamentar mis ideas con la

investigación y las nuevas tecnologías, acercándome al grupo de investigación en rendimiento deportivo del INEFC Barcelona.

A **Anabel Blasco**, del Servicio de Estadística Aplicada de la Universidad Autónoma de Barcelona, por su colaboración en el análisis estadístico de los estudios.

A **Gylton Da Matta**, por irrumpir en mi vida y saber aunar el conocimiento científico con la experiencia vital y profesional en el voleibol, y por compartirlo todo conmigo a través de tu amistad sincera.

A **Lluís Enric Molada, Josep Riera y Jaume Febrer**, parte de mi “familia” en Mallorca, que han sabido transmitirme sus virtudes, emocionarme y acompañarme en momentos que nos quedarán para siempre en nuestra amistad.

A **Federico Rodríguez, Santiago García y Adrián Fiorenza**, mis compañeros en el voleibol, por escucharme y acompañarme en mi crecimiento. Por vuestras palabras y vuestras acciones, y por un día a día que nos deja momentos imborrables, compartiendo la pasión por un voleibol mejor.

Al INEFC de Barcelona y todos sus integrantes del **PAS y PDI**, por ser mi apoyo y mi familia en Barcelona cada día, durante 15 años. Ha sido un privilegio poder compartir y aprender con todos/as vosotros/as.

Al **CV Barcelona-Barça**, por su colaboración en parte de estos estudios y por darme las facilidades necesarias para acercar la investigación científica al voleibol.

A tantas y tantas jugadoras con las que he tenido la posibilidad de compartir este deporte, porque, por mi manera de entenderlo y de vivirlo, todos vuestros nombres y vuestras personalidades me acompañan y forman parte de lo que soy ahora. Por ser vosotras mismas, por ser inconformistas y por aspirar siempre a más. Por mostrar que, trabajando en equipo y en compañía, se llega siempre más lejos.



## RESUMEN

En todos los deportes de interacción con un móvil, sea este un balón (fútbol, voleibol, baloncesto...), una pelota (tenis) o una bola (golf, tenis de mesa, hockey...), hay alguna acción técnica que resulta decisiva para el rendimiento y el desenlace de la competición deportiva. Estas acciones, como el remate en el voleibol, determinante para la victoria en este deporte (Challoumas & Artemiou, 2018; Marcelino et al., 2008; Ureña, 1998), han sido estudiadas con gran interés a lo largo de la historia en condiciones de laboratorio, aisladas del juego real (Oliveira et al., 2020). En el caso del voleibol, la carrera batida de remate (CBR) es una acción de alta complejidad coordinativa por la necesidad de combinar la habilidad en el salto vertical con una carrera previa y un golpeo final en suspensión. Por este motivo se ha estudiado el gesto técnico sin el balón (Ciapponi et al., 1996; Coutts, 1982; Salci et al., 2004; Sheppard et al., 2008; Smith et al., 1992) o con el balón colgado, para que siempre se realice a la misma altura (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Wagner et al., 2009; Wagner et al., 2012; Wedaman et al., 1988) y en condiciones estables para poder medir parámetros biomecánicos incluso con plataformas de fuerza. Gracias a la evolución de las tecnologías y a la posibilidad de realizar análisis cinemático 3D, aumentaron los estudios analizando la CBR con el balón colocado en condiciones similares a las de un partido (Marquez et al., 2009; Reeser et al., 2010; Seminati et al., 2015; Serrien et al., 2018). No obstante, estas metodologías han alejado a los deportistas de las condiciones de libertad de movimiento que tienen durante la CBR en el juego, en aras a identificar cuáles son los parámetros biomecánicos que ayudan a mejorar la altura en el salto y la velocidad en el golpeo, dividiendo así la CBR en subfases para cuantificar la importancia de cada una de ellas con el fin de optimizar dichos factores. Estos abordajes desde la perspectiva de análisis lineal no tienen en cuenta que las oscilaciones del movimiento humano se pueden evaluar como cualquier serie temporal (Couceiro et al., 2014), y las series temporales fruto de señales fisiológicas presentan fluctuaciones no lineales, por lo que realizar un análisis estadístico mediante técnicas lineales nos dará como resultado una información parcial del movimiento (Orellana & Torres, 2010). La aparición de los dispositivos IMU, ligeros y no invasivos, capaces de cuantificar los gestos técnicos mediante series temporales completas, permitirán afrontar el desafío del análisis no lineal del patrón de movimiento (PM) de la CBR a través del cálculo de su entropía y establecer su relación con la estructura coordinativa del movimiento a través de los cambios en la variabilidad de movimiento (VM) (Preatoni et al., 2013).

En esta tesis se abordó el estudio de la CBR como una acción técnica compleja tratándola como un PM. Primeramente, con el análisis de las fuerzas de impacto que se transmiten a la zona lumbar y los intervalos de tiempo utilizados en las diferentes fases en las que se puede desglosar la CBR, con y sin el condicionante del balón, utilizando la señal de aceleración obtenida al colocar un IMU en la zona lumbar cerca del centro de gravedad. Posteriormente, a través de un análisis no lineal a partir de la señal de aceleración, calculando la VM de la CBR cuando se realiza con o sin el condicionante del balón, por la zona II y IV del campo y cuando es realizada por jugadoras de diferentes categorías y posiciones de juego.

Desde la perspectiva dinámica de la VM, existen condicionantes internos (propios de la estructura interna del cuerpo) y externos, relacionados con la información visual que tenemos del entorno y que determinan la aparición de nuevos patrones de acción (Newell, 1986). De esta forma, consideramos como condicionantes externos el balón y la zona del campo por la que se realizó la CBR y como condicionantes internos la categoría de la deportista y la posición de juego.

En esta tesis participaron un total de 48 jugadoras que realizaron 8 series de 6 CBR, 4 de ellas por zona IV y 4 por zona II (2 con balón y 2 sin balón en cada zona), con un dispositivo WIMU situado a la altura de la L5 utilizando un cinturón rígido especialmente diseñado para este estudio.

El primer estudio tuvo como objetivo medir la transmisión de las fuerzas de impacto a la zona lumbar (L5) en cada paso de la CBR y los tiempos entre fases, para medir las diferencias que se producían entre la CBR realizada con y sin balón. Además, lo analizamos por categorías, lo que nos permitió observar las características del PM de la CBR en cada etapa en cuanto a fuerzas de impacto y tiempos de realización. Observamos, en el global, diferencias con el condicionante del balón, tanto en el inicio del PM, en las fases del paso de orientación ( $a1$ ), y en el impulso de frenado ( $a2$ ), como en el final, en la fase de aterrizaje ( $a5$ ). En cuanto a los tiempos, también observamos diferencias entre el paso de orientación y el impulso de frenado ( $t1-2$ ), en el tiempo del impulso de aceleración y el aterrizaje ( $tvuelo$ ), y en el tiempo total de la CBR ( $tCBR$ ). En la categoría *infantil* se encontraron diferencias sólo en la  $a2$  y en  $t1-2$ , en  $tvuelo$  y en  $tCBR$ . En la categoría *cadete*, en  $a1$ ,  $a2$ ,  $a3$  y  $t1-2$ , y en  $tCBR$ . En la categoría *juvenil*, en  $a2$ , en  $tvuelo$  y en  $tCBR$ . En la categoría *sénior*, en  $a2$ , en  $a5$ , en  $t1-2$ , en  $tvuelo$  y en  $tCBR$ . Las diferencias en ambos parámetros, tanto en los momentos de ajuste con el balón como en la duración de la

CBR, nos permitieron observar cómo la aparición del balón como condicionante externo afectó a la realización de la CBR en el global y en cada una de las categorías.

El segundo estudio tuvo como objetivo analizar la VM de la CBR realizada por los lados derecho e izquierdo del campo, con y sin balón como condicionante externo. Con el condicionante del balón observamos un aumento de 0,0279 unidades de entropía respecto a sin balón, mientras que no se observaron diferencias entre zonas del campo, con un aumento de 0,0004 unidades de entropía llegando a la conclusión que la VM de la CBR fue similar al realizarse por la parte derecha o izquierda del campo, mientras que la VM de la CBR fue superior con el condicionante del balón. A su vez, se apreció una alta VM de la CBR entre las jugadoras, lo que mostró la existencia de un perfil de rendimiento exclusivo, fruto de sus características morfológicas y particulares.

El tercer estudio tuvo como objetivo analizar la VM de la CBR considerando dos factores internos del voleibol: las diferentes categorías de este deporte (*infantil, cadete, juvenil, sénior*) y los roles específicos del juego (*colocadora, punta, central, líbero*). En cuanto a la realización de la CBR sin balón, hubo diferencias entre la categoría *infantil* y la *sénior*, 0,0118 unidades, con una significación del 5%. Aunque no fueron significativas al 5%, cuando buscamos significaciones al 10% también se encontraron diferencias entre *infantil* y *sénior* con balón, 0,0098 unidades, entre *infantil* y *cadete* con y sin balón, 0,0096 y -0,0090 unidades respectivamente y entre *infantil* y *juvenil*, también con y sin balón, 0,0094 y 0,0092 unidades para cada interacción. Cabe resaltar que la categoría *infantil* fue la única que mostró diferencias con el resto de las categorías en ambos tipos de ataque. En cuanto a la posición de juego, no se encontraron diferencias en la CBR sin balón, mientras que, con balón, la posición *punta* muestra diferencias respecto a las posiciones *central* y *líbero*, con una disminución de 0,00974 y 0,01619 unidades de entropía. La posición de *colocadora* también presentó diferencias respecto a la de *líbero*, con una disminución de 0,01702 unidades de entropía, mientras que, con una significación del 10%, tuvo diferencias respecto a la posición *central*, con 0,01057 de disminución. La posición *punta* fue la que presentó una menor VM en la CBR respecto a las demás. Por un lado, cuando consideramos el condicionante interno de la categoría, la VM disminuyó de forma significativa entre las categorías *infantil* y *cadete*, estabilizándose en el resto de categorías, tanto con balón como sin balón, mostrando que a partir de la categoría *cadete* se consolidaba el PM de la CBR y se alcanzaba la etapa de madurez. Por otro lado, considerando el condicionante de la posición de juego, sólo

afloraron diferencias bajo la condición con balón, siendo la posición *punta* la que tuvo valores de VM más bajos, fruto de la mayor práctica de la CBR.

En la CBR con el condicionante del balón, las fuerzas de impacto producidas en la zona lumbar son superiores a las producidas en la CBR sin el condicionante del balón en la mayoría de los apoyos, mientras que el *tCBR* y el *tvuelo* fueron inferiores a la CBR realizada sin balón.

La VM de la CBR es más alta cuando se realiza con el condicionante del balón, no presenta variaciones cuando se realiza por el lado derecho e izquierdo del campo, es más baja en la categoría infantil en comparación con el resto de las categorías y en las jugadoras *punta* en comparación con las centrales, colocadoras y *líberos*.

# ABSTRACT

Every sport which interacts with a mobile, be it a middle size ball (soccer, volleyball, basketball ...) or small ball (golf, tennis, table tennis, hockey...), there is some technical action that is decisive for the performance and the final score. These actions, such as the spike in volleyball, a decisive action to win the game in this sport (Challoumas & Artemiou, 2018; Marcelino et al., 2008; Ureña, 1998), have been studied with great interest throughout history, in laboratory conditions isolated from the real game (Oliveira et al., 2020). In volleyball, the spike movement approach (CBR) is highly complex due to the need to combine the ability to jump vertically with a previous run and a final hit in suspension. Therefore, the technical action has been studied without the ball (Ciapponi et al., 1996; Coutts, 1982; Salci et al., 2004; Sheppard et al., 2008; Smith et al., 1992) or with the ball suspended in a rope to maintain constant testing conditions (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Wagner et al., 2009; Wagner et al., 2012; Wedaman et al., 1988) and in stable conditions to be able to measure biomechanical parameters even with force platforms. It was with the evolution of technologies and the possibility of 3D kinematics analysis that the studies analyses CBR in a similar game conditions (Marquez et al., 2009; Reeser et al., 2010; Seminati et al., 2015; Serrien et al., 2018).

However, these methodologies have taken athletes away from the conditions of freedom of movement that they have during CBR in the game, to find which are the biomechanical parameters that help improve jump height and hitting speed, thus dividing the CBR into sub-phases to quantify the importance of each of them to optimize these factors. These approaches from the linear analysis perspective do not take into account that the oscillations of human movement can be evaluated as any time series (Couceiro et al., 2014), and the time series resulting from physiological signals present non-linear fluctuations. However, realize a statistical analysis using linear techniques will result in partial movement information (Orellana & Torres, 2010). The appearance of IMU devices, lightweight and non-invasive, capable of quantifying technical actions through complete time series, will make it possible to face the challenge of non-linear analysis of the CBR movement pattern (PM) by calculating its entropy and establishing its relationship with the coordinative structure of the movement through changes in the movement variability (VM) (Preatoni et al., 2013).

In this thesis the study of CBR is approached as a complex technical action treating it as a PM. First, with the analysis of the impact forces transmitted to the spine and the time intervals

used in the different CBR phases, with and without the conditioning of the ball, using the acceleration signal obtained from an IMU device placed on the spine close to gravity center. Subsequently, through a non-linear analysis from the acceleration signal, calculating the VM of the CBR when it is performed with or without the conditioning of the ball, by zone II and IV of the field and when it is performed by players of different game categories and positions.

From the dynamic perspective of VM, there are internal constraints (typical of the internal body structure) and external constraints related to the visual information we have from the environment that force the appearance of new action patterns (Newell, 1986). In this way, we will consider the ball and the area of the field through which the CBR is performed as external constraints, and the category of the athlete and the playing position as internal constraints.

A total of 48 players participated in this thesis who performed 8 series of 6 CBR, 4 of them per zone IV and 4 per zone II (2 with the ball and 2 without the ball in each zone), with an IMU device located at the height of the L5 using a rigid belt specially designed for this study.

The first study aimed to measure the transmission of impact forces to the spinal column (L5) in each step of the CBR and the times between phases, to measure the differences that occurred between the CBR performed with and without ball. In addition, we analysed it by categories, which allowed us to observe the characteristics of the CBR PM at each stage in terms of impact forces and performance times. We observed in the global, differences with ball constraint, both in the beginning of the movement of the PM, in the phases of the orientation step ( $a1$ ), and in the braking impulse ( $a2$ ), as in the end, in the landing phase ( $a5$ ). Regarding the times, we also observed differences between the orientation step and the braking impulse ( $t1-2$ ), in the time in the acceleration impulse and landing ( $tvuelo$ ) and in the total time of the CBR ( $tCBR$ ). In the *infantil* category, differences were found only in the  $a2$  and in  $t1-2$ , in  $tvuelo$  and in  $tCBR$ . In the *cadete* category in  $a1$ ,  $a2$ ,  $a3$  and  $t1-2$ , and in  $tCBR$ . In the *juvenil* category in  $a2$ , in  $tvuelo$  and in  $tCBR$ . In the *sénior* category in  $a2$ , in  $a5$ , in  $t1-2$ , in  $tvuelo$  and in  $tCBR$ . The differences in both parameters, both in the moments of adjustment with the ball and in the duration of the CBR, allow us to observe how the appearance of the ball as an external constraint affects the performance of the CBR in the global and in each of the categories.

The second study aimed to analyse the VM of the CBR performed on the right and left side of the court with and without the ball as an external constraint. With the ball constraint, we observed an increase of 0.0279 entropy units compared to without the ball, while no differences were observed between areas of the court with an increase of 0.0004 entropy units. Reaching the conclusion that the VM of the CBR is similar when performed on the right and left side of the field while the VM of the CBR will be higher with the ball constraint. Otherwise, a high VM of the CBR is appreciated among the players, which shows the existence of an exclusive performance profile because of their morphological and characteristics.

The third study aimed to analyse the VM of the CBR in two internal constraints, such as the different categories of volleyball (*infantil, cadete, juvenil, sénior*) and the specific roles of the game (*colocadora, punta, central, libero*). Regarding the performance of the CBR without ball, there were differences between the *infantil* category and the Senior category 0.0118 units with a significance of 5%. Although they are not significant at 5%, when we look for significance at 10%, differences are also found between *infantil* and *sénior* with ball, 0.0098 units. Between *infantil* and *cadete* with and without ball, 0.0096 and -0.0090 units respectively and between *infantil* and *juvenil* also With and Without ball 0.0094 and 0.0092 units for each interaction. It should be noted that the *infantil* category is the only one that shows differences with the rest of the categories in both Attack Types. Regarding the playing position, no differences were found in the CBR without ball, while with ball the *punta* position has differences with the *central* and *libero* position with a decrease of 0.00974 and 0.01619 entropy units. The *punta* position also presented differences with the *libero* with a decrease of 0.01702 entropy units while with a significance of 10% it had differences with the *central* position with 0.01057 decrease. The *punta* position will be the one that will present a lower VM in the CBR compared to the others. On the one hand, in the internal constraint of the category, the VM decreases significantly between the *infantil* and *cadete* categories, stabilizing in the rest in the Ball and without Ball constraints, showing that from the *cadete* category the PM of the CBR consolidates, and the maturity stage is reached. On the other hand, in the playing position constraint, there are only differences with the ball constraint, being the *punta* position the one with the lowest VM values because of the greater practice of the CBR.

In the CBR with the ball constrain, the impact forces produced in the lumbar area are higher than those produced in the CBR without the ball constrain in most of the supports, while the *tCBR* and the *tvuelo* were lower than the CBR performed without the ball.

The MV of the CBR is higher when it is performed with the ball constrain, it does not present variations when it is performed on the right and left side of the field, it is lower in the *infantil* category compared to the rest of the categories and in the *punta* players compared to *centrales*, *colocadoras* and *liberos*.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS .....	V
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	13
ÍNDICE DE FIGURAS.....	21
ÍNDICE DE TABLAS.....	23
ABREVIATURAS .....	25
1. MOTIVACIONES DEL AUTOR Y ANTECEDENTES DE LA TESIS.....	27
2. INTRODUCCIÓN.....	31
3. LA CARRERA BATIDA REMATE EN EL VOLEIBOL COMO DEPORTE DE EQUIPO .....	41
3.1. El remate en el voleibol.....	44
3.2. Descripción de la técnica de la carrera batida de remate.....	46
3.2.1. Fase de carrera de aproximación .....	49
3.2.2. Fase de batida .....	52
3.2.3. Fase de preparación del golpeo .....	57
3.2.4. Fase de golpeo.....	63
3.2.5. Fase de aterrizaje .....	66
3.3. La carrera batida de remate como patrón de movimiento .....	69
3.4. La percepción visual y su influencia en la interceptación del balón .....	71
3.4.1. El mecanismo de procesamiento de la información y la toma de decisión .....	72
3.4.1.1. Fuentes de información necesarias para anticipar la trayectoria de un objeto en movimiento.....	73
3.4.1.2. Información visual utilizada para la percepción de las trayectorias .....	74
3.4.1.3. Información propioceptiva para la percepción de las trayectorias .....	76
3.4.2. Tiempo motor y respuesta de reacción .....	76
3.4.3. Interceptación o anticipación coincidente.....	77
3.4.4. Factores que influyen en la percepción de las trayectorias.....	78
3.4.4.1. La percepción de las trayectorias en expertos y noveles.....	78
3.5. Evolución de la carrera batida de remate desde la iniciación hasta el alto rendimiento.....	79
3.6. La carrera batida de remate en noveles vs. expertos .....	80
3.7. Posiciones de juego en el voleibol .....	96
3.7.1. El ataque por las diferentes zonas del campo.....	98
3.8. Formas de analizar la carrera batida de remate .....	101

3.9.	Las fuerzas de impacto en el voleibol: medidas e influencia .....	110
	Resumen del capítulo.....	113
4.	LOS DISPOSITIVOS IMU Y SU UTILIZACIÓN EN EL DEPORTE.....	117
5.	LA VARIABILIDAD DEL MOVIMIENTO DESDE LA PERSPECTIVA DE LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS DINÁMICOS.....	123
5.1.	El ser humano como sistema complejo, dinámico y abierto .....	125
5.1.1.	Grados de libertad.....	126
5.1.2.	Concepto de no linealidad.....	127
5.1.3.	Parámetros de control y de orden .....	127
5.1.4.	Histéresis .....	127
5.1.5.	Autoorganización .....	127
5.1.6.	Estabilidad y atractores en un sistema dinámico complejo.....	128
5.2.	La variabilidad del movimiento humano.....	131
5.3.	El análisis de la variabilidad del movimiento .....	136
5.3.1.	La entropía como magnitud de medida para el análisis no lineal de la variabilidad del movimiento .....	136
5.3.1.1.	Entropía aproximada.....	137
5.3.1.2.	Entropía muestral.....	138
5.3.1.3.	Entropía multiescala.....	139
5.4.	La variabilidad del movimiento en el deporte .....	139
	Resumen del capítulo.....	141
6.	JUSTIFICACIÓN DEL OBJETIVO GENERAL DE ESTA TESIS.....	143
7.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	147
7.1.	Objetivo General .....	149
7.2.	Objetivos e hipótesis de los estudios .....	149
	Estudio 1.....	149
	Estudio 2.....	150
	Estudio 3.....	150
8.	ESTUDIOS .....	151
8.1.	Parte experimental.....	153
8.1.1.	Participantes.....	154
8.1.2.	Material.....	156
8.1.3.	Protocolo .....	157
8.2.	Estudio 1: Transmisión de las fuerzas de impacto a la zona lumbar durante la carrera batida de remate con y sin el condicionante del balón en jugadoras de voleibol de diferentes categorías.....	161

Objetivo principal.....	163
Objetivos secundarios.....	163
Hipótesis.....	163
Análisis de los datos.....	163
Análisis estadístico.....	164
Resultados.....	164
Discusión.....	189
Conclusiones.....	198
Perspectivas de futuro.....	198
8.3. Estudio 2: Análisis de la variabilidad de la carrera batida de remate realizada por los lados derecho e izquierdo del campo, con balón y sin el condicionante del balón.....	199
Objetivo principal.....	201
Hipótesis.....	201
Análisis de datos.....	201
Análisis estadístico.....	201
Resultados.....	202
Discusión.....	206
Conclusiones.....	210
8.4. Estudio 3: Análisis de la variabilidad de la carrera batida de remate en las diferentes categorías del voleibol ( <i>infantil, cadete, juvenil, sénior</i> ) y en los roles específicos del juego ( <i>colocadora, punta, central, líbero</i> ), en un club de élite.....	211
Objetivo principal.....	213
Hipótesis.....	213
Análisis de datos.....	213
Análisis estadístico.....	213
Resultados.....	214
Discusión.....	228
Conclusiones.....	233
9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GLOBALES.....	235
10. REFERENCIAS.....	243



# ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1:</i> Fotoseriación de la CBR completa con balón, con las fases detalladas en la propuesta de esta tesis. ....	48
<i>Figura 2.</i> Fotoseriación de la carrera de aproximación. ....	50
<i>Figura 3.</i> Diferencias entre las trayectorias de una jugadora diestra y otra zurda para realizar un ataque por las zonas IV y II. ....	51
<i>Figura 4.</i> Fotoseriación de la fase de batida del remate. Impulso de frenado en la primera instantánea e impulso de aceleración en las dos siguientes. ....	53
<i>Figura 5.</i> Subfases de impulso de frenado y aceleración (adaptado de Fuchs, 2019a). ....	56
<i>Figura 6.</i> Fotoseriación de la fase de preparación del golpeo. ....	58
<i>Figura 7.</i> Armado tradicional, de elevación o de arquero (a). Armado alternativo o circular (b) (adaptada de Oliveira, 2020). ....	59
<i>Figura 8.</i> Representación del incremento de la velocidad angular durante la cadena cinemática del golpeo en el remate (Valadés Cerrato, 2005). ....	61
<i>Figura 9.</i> Fotoseriación de la fase de golpeo del remate. ....	63
<i>Figura 10.</i> Diferencia de altura de golpeo en función de la posición corporal (modificado de Vint,1998). ....	65
<i>Figura 11.</i> Fotoseriación de la fase de caída del remate. ....	66
<i>Figura 12.</i> Análisis de la información para la ejecución perceptivo-motriz (Sillero, 2002). ....	72
<i>Figura 13.</i> Zonas del campo por las que se puede realizar la CBR y situación de los/as jugadores/as en él, en función de su cercanía a la red (delanteros/as y zagueros/as). ....	99
<i>Figura 14.</i> Imagen del balón de voleibol Molten V5M5000 utilizado en los estudios. ....	156
<i>Figura 15.</i> Báscula con tallímetro IC6003. ....	156
<i>Figura 16.</i> Cámara portátil de alta velocidad Casio Exilim EXZR100. ....	156
<i>Figura 17.</i> Dispositivo WIMU y el cinturón diseñado para los estudios. ....	157
<i>Figura 18.</i> Diseño de los estudios para CBR sin balón, colocación de las cámaras y situación de la deportista por zona II y zona IV. ....	160
<i>Figura 19.</i> Diseño de los estudios para la CBR con balón, colocación de las cámaras y situación de la deportista por zona II y zona IV. ....	160
<i>Figura 20.</i> Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en el global de jugadoras. ....	169
<i>Figura 21.</i> Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB en el global de las jugadoras. ....	171
<i>Figura 22.</i> Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB de la categoría infantil. ....	173

<i>Figura 23. Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB de la categoría cadete.</i> .....	175
<i>Figura 24. Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB de la categoría juvenil.</i> .....	177
<i>Figura 25. Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB de la categoría sénior.</i> .....	179
<i>Figura 26. Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB de la categoría infantil.</i> .....	181
<i>Figura 27. Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB de la categoría cadete.</i> .....	183
<i>Figura 28. Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB de la categoría juvenil.</i> .....	185
<i>Figura 29. Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB de la categoría sénior.</i> .....	187
<i>Figura 31. Valores de las medias de la SampEn en la CBR por categorías.</i> .....	216
<i>Figura 32. Diagrama de caja por categoría y jugadora con los valores de SampEn de la CBR.</i> ..	217
<i>Figura 33. Interacciones entre categorías por el tipo de ataque. Las diferencias de significación mostradas son * <math>p &lt; 0,05</math> y ** <math>p &lt; 0,1</math>.</i> .....	221
<i>Figura 34. Valores de las medias de la SampEn en la CBR por posición en el juego.</i> .....	224
<i>Figura 35. Diagrama de caja con los valores de media <math>\pm</math> DE por posiciones de juego por cada jugadora.</i> .....	224
<i>Figura 36. Interacciones entre las posiciones de juego y el tipo de ataque. Las diferencias de significación mostradas son * <math>p &lt; 0,05</math> y ** <math>p &lt; 0,1</math>.</i> .....	227

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los estudios realizados en expertos.....	82
Tabla 2. Resumen de estudios que combinan noveles y expertos.....	84
Tabla 3. Resumen de estudios que relacionan noveles y expertos.....	93
Tabla 4. Número de remates realizados por zona durante 55 partidos de la Champions masculina (Grgantov et al., 2018).....	100
Tabla 5. Estudios que han medido la CBR mediante cinemática 3D.....	102
Tabla 6. Estudios que han medido alguna fase de la CBR mediante plataformas de fuerza.....	107
Tabla 8. Valores de las jugadoras por categorías expresados en media. ....	155
Tabla 9. Valores medios $\pm$ desviación estándar de todas las variables de la CBR sin balón (SB) para las diferentes categorías. ....	165
Tabla 10. Valores medios $\pm$ desviación estándar de todas las variables de la CBR con balón (CB) para las diferentes categorías. ....	166
Tabla 11. Valores medios $\pm$ su desviación estándar de las fases de la CBR con balón (CB) y sin balón (SB) en el global y sus porcentajes de incremento. ....	167
Tabla 12. Resultado de la significación de la variable balón (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases. ....	168
Tabla 13. Resultado de la significación de la variable balón (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. ....	170
Tabla 14. Resultado de la significación de la variable balón (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases. ....	172
Tabla 15. Resultado de la significación de la variable <i>balón</i> (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases. ....	174
Tabla 16. Resultado de la significación de la variable balón (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases. ....	176
Tabla 17. Resultado de la significación de la variable <i>balón</i> (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases. ....	178
Tabla 18. Resultado de la significación de la variable <i>balón</i> (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. ....	180
Tabla 19. Resultado de la significación de la variable <i>balón</i> (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. ....	182
Tabla 20. Resultado de la significación de la variable <i>balón</i> (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. ....	184
Tabla 21. Resultado de la significación de la variable <i>balón</i> (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. ....	186

Tabla 22. Valores del número y porcentaje de los tipos de aterrizaje en cada tipo de CBR por categoría. ....	188
Tabla 23. Valores totales de acumulados de CBR sin balón (SB) y con balón (SB) y porcentaje de uso de cada técnica de aterrizaje por categoría.....	188
Tabla 24. Valores de medias $\pm$ DE de las características del global de las jugadoras. ....	202
Tabla 25. Estadísticos descriptivos de las variables <i>SampEn</i> (a.u.) con los condicionantes de las zonas y del balón. ....	203
Tabla 26. Estadísticos de resumen para la variable <i>SampEn</i> (a.u.) según los condicionantes de la zona del campo (zona II y zona IV) y del balón (con y sin balón).....	203
Tabla 27: Efectos de la variable en el modelo mixto para la entropía. ....	205
Tabla 28. Valores $\pm$ DE de los descriptivos de las características de las jugadoras por categoría. ....	214
Tabla 29. Valores $\pm$ DE de los descriptivos de las características de las jugadoras por posición ( <i>puntas, liberos, centrales y colocadoras</i> ). ....	215
Tabla 30. Estadísticos descriptivos de las variables <i>SampEn</i> (a.u.) con el condicionante de la categoría de juego por edad. ....	215
Tabla 31. Estimación de los efectos fijos del modelo.....	218
Tabla 32. Valores de la comparación de la interacción entre las variables <i>tipo de ataque</i> y <i>categoría</i> . ....	219
Tabla 33. Valores de la comparación de la interacción entre las variables <i>categoría</i> y <i>tipo de ataque</i> . ....	220
Tabla 34. Valores de la estimación de los efectos fijos del modelo.....	222
Tabla 35. Estadísticos descriptivos de las variables <i>SampEn</i> (a.u.) con el condicionante <i>posición de juego</i> . ....	223
Tabla 36. Estimación de los efectos fijos del modelo.....	225
Tabla 37. Valores de la comparación de la interacción entre las variables <i>tipo de ataque</i> y <i>posición</i> . ....	226

# **ABREVIATURAS**

CBR Carrera batida de remate

PM Patrón de movimiento

VM Variabilidad del movimiento

SampEn Entropía muestral

ApEn Entropía aproximativa

CdG Centro de gravedad



# **1. MOTIVACIONES DEL AUTOR Y ANTECEDENTES DE LA TESIS**



Para entender el contexto de elaboración de esta tesis debemos remontarnos al año 2005, año en el que, por primera vez, asumí el papel de entrenador principal de un equipo de voleibol en categoría nacional. Ya desde ese momento, mientras cursaba el tercer curso de la Licenciatura en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte en el Instituto Nacional de Educación Física (INEFC Barcelona), me adentré de lleno en el mundo del entrenamiento y todo lo que le rodea, poniendo especial interés en dilucidar porqué cada deportista respondía de forma particular y diferente ante los mismos estímulos de aprendizaje. En el proceso de búsqueda durante mis estudios universitarios tuve el apoyo de mis profesores Domingo García y Hermipio Romero, que mantuvieron y avivaron mi pasión por este deporte y las características que lo hacen especial, pero fue en las clases con Gerard Moras donde el voleibol y el deporte cobraron una nueva dimensión para mí. El pensamiento y la investigación científica al servicio de las mejoras de los deportistas y del propio juego aparecieron como una nueva vía en la que sustentar el crecimiento deportivo y el perfeccionamiento en la pista. Este primer contacto me llevó a replantear mi forma de entrenar para dotarla de mayor precisión, a través de la investigación y la recopilación de datos sobre los procesos y los resultados en entrenamientos y en partidos, tanto a nivel individual como colectivo. De esta forma, al terminar mis estudios universitarios y con la inquietud de profundizar aún más, seguí formándome a la vez que mi actividad como entrenador iba creciendo hasta convertirse en mi actividad profesional principal y a la que me dedicaba plenamente. Durante estos años, nunca dejé de tener relación con mis profesores de la Universidad ya que, para mí, entrenamiento e investigación siempre fueron de la mano. Pero fue en 2009 cuando surgió la oportunidad de empezar a trabajar como profesor de voleibol en el INEFC de Barcelona, al lado de Domingo García y Gerard Moras. Desde que empecé a compaginar la docencia universitaria con la labor de entrenador, investigación y entrenamiento se fueron entrelazando a medida que avanzaba mi formación en postgrados. Así fue como, ya en mi Trabajo Final de Máster (TFM), trabajé con Gerard Moras como tutor llevando a cabo nuestra primera investigación conjunta, en la que ya establecimos una buena sintonía de trabajo entre ambos. Una vez asentado como profesor de Voleibol en la Universidad (INEFC), y manteniendo una relación diaria con Gerard Moras, fueron muchas las conversaciones en las que tuvimos ocasión de intercambiar impresiones sobre nuevas tendencias y posibilidades aplicadas a proyectos de investigación. Ello dio pie, en 2014, a que emprendiera la elaboración de mi tesis doctoral sobre un tema muy novedoso y desconocido hasta ese momento como es el uso del análisis de la entropía como herramienta de análisis no lineal. Este enfoque permitiría medir la

complejidad de los sistemas en el ámbito del deporte y del movimiento humano, con el propósito de profundizar más en el conocimiento de los deportistas y del juego, aunando análisis cuantitativo y cualitativo.

## **2. INTRODUCCIÓN**



Vivimos en una sociedad configurada sobre una perspectiva reduccionista y sustentada en la idea de que el todo es la suma de sus partes (Urbán, 2015). Así, un título universitario es la suma de créditos aprobados, la consecución de un objetivo es la suma de esfuerzos realizados, la galaxia es la suma de sus planetas, una ciudad es la suma de sus habitantes... Hablamos de una sociedad determinada por las leyes newtonianas, con el principio de acción y reacción como paradigma, donde todo se puede medir y en la que todo acto debe tener su recompensa, positiva o negativa según la bondad de la acción realizada. Hablamos también de una sociedad que promueve la especialización, el conocimiento profundo sobre una materia muy concreta, con el que obtener el mejor rendimiento posible en ese restringido ámbito y a partir del cual podamos aportar nuestro granito de arena para levantar la gran montaña del saber formada entre todos.

Pero la ciencia avanza a medida que se descubren y perfeccionan los instrumentos de medida que permiten observar la realidad con mayor y mejor detalle (Boyd et al., 2011; Chandler et al., 2014; Cormack et al., 2014; Montgomery et al., 2010) , y esto permite a la comunidad científica, cíclicamente, poder comprobar teorías formuladas anteriormente, teorías que, con el paso del tiempo, cambiarán nuestra sociedad.

Con los primeros escritos de la *teoría del caos* y el Efecto Mariposa, que Lorenz redactó en 1963, se dio el primer paso para arrojar luz sobre las hipótesis formuladas por Poincaré unos 70 años antes. No fue hasta ese momento, gracias a la evolución de los ordenadores, que se pudo empezar a comprobarlas. Estos avances fueron los que nos permitieron, como sociedad, empezar a convivir con la Teoría de los Sistemas Dinámicos Complejos, según la cual todo está interconectado en un sistema macroscópico en el que sus componentes ejercen una gran influencia entre sí, de forma que el cambio experimentado en uno de ellos repercutirá de forma inevitable sobre el resto (Hayles, 1990). Según este modelo, ya no se trata de trabajar en una fábrica como parte de un eslabón de la cadena de producción, ya no es tan importante la cantidad como la calidad y ya no prevalece la cuestión del *qué* se hace sino del *para qué* se hace.

Por todo ello, empezamos a configurar una sociedad más concienciada de que formamos parte de un todo y de que las acciones realizadas en un punto del planeta pueden afectar directamente a alguien situado en el extremo opuesto en pocos días o en pocas horas (Lorenz, 1963). Y esto nos está incitando a buscar un equilibrio en nuestras acciones, considerando siempre el hilo conductor que las relaciona y en aras a alcanzar un objetivo superior común, como podría ser la mera supervivencia del planeta.

El mundo del deporte no es ajeno a estos cambios y ya en la actualidad es muy complicado conseguir que el rendimiento deportivo mejore simplemente reuniendo a los mejores jugadores, formando equipos con grandes estrellas o individualidades “galácticas”. Cada vez son más numerosos los ejemplos de construcciones de equipos ganadores que se configuran considerando la complementariedad de los individuos en ese sistema más complejo llamado “equipo”. En ellos emergen nuevas cualidades que no se le pueden atribuir a ninguno de los componentes por sí sólo y se gestiona de manera más orgánica la eventual inhibición de las cualidades intrínsecas de cada uno de los elementos que lo forman. Una neurona por sí sola no posee ninguna inteligencia, pero millones de ellas unidas e interactuando entre sí originan una mente con capacidad para pensar, constituyendo un ejemplo, en nuestro propio cuerpo, de que diseccionando microscópicamente un sistema para tratar de explicarlo obtenemos una información sesgada e incompleta, que no nos permite describir su funcionalidad (Orellana & Torres, 2010).

Por ello consideramos que la visión global y el estudio de la complejidad de los sistemas nos permite encontrar explicaciones más fieles a la realidad que la que nos proponen la perspectiva determinista y su visión mecanicista del mundo. Actualmente, gracias a las herramientas de análisis no lineales, podemos empezar a medir macroscópicamente un sistema y su variabilidad (Stergiou et al., 2006).

Si entendemos el equipo como un sistema dinámico complejo y a los seres humanos que lo integran, a su vez, como un sistema complejo dinámico y abierto, nos daremos cuenta de que la vía para comprender la integración de todos sus componentes pasa por la necesidad de conocerlos a todos y cada uno de ellos. En un deporte colectivo como el voleibol, sin posibilidad de contacto con el rival para obstaculizar su juego y dónde el éxito y el resultado dependen del orden y el desempeño del equipo (Grgantov et al., 2018), podemos entender el equipo como un sistema susceptible de ser analizado. Abordamos, así, para estudiar el comportamiento del equipo, un análisis de alta complejidad, a la vez que apasionante, un análisis que requiere conocer a cada integrante de forma profunda, analizar a cada jugadora, en definitiva, como persona.

Históricamente, han sido muchos los abordajes que se han propuesto para estudiar a las jugadoras y sus características. Todos ellos análisis lineales, llevados a cabo desde la perspectiva reduccionista: estudios psicológicos y de comportamiento, estudios de sus características cinéticas y antropométricas, estudios de sus cualidades físicas, de su rendimiento físico, técnico,

y táctico... (Ciapponi et al., 1996; Fuchs et al., 2019; Marquez et al., 2009; Paz et al., 2017). Se trata de métodos que aportan un conocimiento sesgado, una parte del todo, pero que por sí solos resultan insuficientes para mostrar la verdadera magnitud de una jugadora y su influencia al integrarse en un sistema complejo como es el equipo (Orellana & Torres, 2010). Es precisamente la interacción entre las jugadoras (como sistemas complejos) lo que constituye un sistema complejo mayor llamado equipo.

La búsqueda incesante de la humanidad por nombrar y ordenar todas las cosas ha llevado a la comunidad científica a buscar la forma de categorizar a las personas, creando categorías en las que encajen y se puedan realizar generalizaciones y conclusiones globales. Conclusiones, la mayoría de ellas, que nos ayudan a formarnos una imagen del presente agrupando lo sucedido en el pasado para, a partir de ello, tratar de realizar predicciones sobre un futuro. Pero el Principio de Superposición no sirve desde la perspectiva de estudio de la complejidad (Urbán, 2015), pues la suma de los efectos provocados por las acciones no permite explicar satisfactoriamente el resultado final.

La jugadora, como sistema complejo en sí mismo, presentará características que, interactuando entre sí, la ayudarán a formar su identidad deportiva. Actualmente, estas características siguen siendo descritas desde una perspectiva reduccionista. En cambio, a nadie se le ocurre analizar de forma lineal las fases de acciones humanas habituales como subir las escaleras, abrir una puerta, conducir, decidir con qué pie bajamos de la cama... todas ellas acciones cotidianas que hacemos de forma automática sin necesidad de pensar en el modo de hacerlas para conseguir un mejor rendimiento. Por el contrario, sí que nos dedicamos a diseccionar las habilidades técnicas deportivas de forma detallada y valorando el rendimiento de cada una de sus fases (Fuchs et al., 2019; Wagner et al., 2009).

Pues bien, la acción ofensiva del remate en el voleibol, con su característico patrón de movimiento (PM), al que denominamos carrera batida de remate (CBR), es la más determinante para obtener la victoria en competición (Ureña, 1998). Para analizar el modo de conseguir un mejor rendimiento en el salto y en la velocidad del balón después del golpeo, este patrón de movimiento, considerado en varias fases y subfases, ha sido estudiado en profundidad hasta nuestros días y ha propiciado abundante literatura científica al respecto. Pero es gracias a la posibilidad de medir la variabilidad de movimiento (VM) de una acción de forma no lineal que

podemos establecer el conjunto o número de variaciones que se producen durante la ejecución de múltiples repeticiones de una misma tarea (Preatoni et al., 2013).

Las nuevas herramientas de análisis no lineal, como la Entropía Muestral (*Sample Entropy*) utilizada en nuestros estudios, muestran la complejidad del movimiento de cada jugadora, determinando los cambios en los niveles de variabilidad intrasujeto a medida que las jugadoras la modifican a lo largo del tiempo, en busca de soluciones coordinativas para superar los condicionantes impuestos en la tarea (Pincus, 1995). Cada jugadora perfecciona el movimiento, alcanzando un estilo propio como si de una huella digital se tratara ( Couceiro et al., 2014).

Es la particularidad de cada jugadora y el hecho de entenderla como única lo que me ha movido, en mi papel de entrenador, a indagar de qué manera se pueden explicar las características individuales de cada jugadora. En este camino, desde la perspectiva del análisis dinámico, he tenido la posibilidad de entender cómo se integran los componentes de un PM como es la CBR, formando un sistema complejo superior que toma la forma de habilidad técnica específica compleja para cada jugadora (Gamboa, 2010).

Desde la perspectiva dinámica de la VM, existen condicionantes internos, propios de la estructura interna del cuerpo, y externos, relacionados con la información visual que tenemos del entorno, que fuerzan la aparición de nuevos patrones de acción (Newell, 1986). Es por ello que la tesis presenta la siguiente estructura: en el primer estudio se describen las fuerzas de impacto con el suelo durante la CBR y la repercusión del golpeo del balón, mientras que en los estudios dos y tres se analiza cómo afectan a la variabilidad de movimiento de la CBR el balón, la zona del campo, la categoría (nivel competitivo) a la que pertenece por edad y la posición de juego específica en cada una de las jugadoras.

### **3. LA CARRERA BATIDA REMATE EN EL VOLEIBOL COMO DEPORTE DE EQUIPO**



El voleibol es considerado uno de los deportes verdaderamente globales; se juega en pabellones deportivos y estadios (219 federaciones nacionales están afiliadas a la FIVB), aunque también es posible practicarlo en parques, en espacios abiertos y en playas de todo el mundo, con poca necesidad de material e implementos, lo que le permite estar presente en todos los continentes (hay constancia de que se juega incluso en la selva y frente a las pirámides en Egipto). Esta globalidad lo sitúa en la lista de los deportes más practicados en todo el mundo, con más de 200 millones de jugadores federados (Aagaard et al., 1997; Briner & Kacmar, 1997).

El voleibol, como el resto de los deportes de equipo, requiere de coordinación, compatibilidad y cohesión entre los compañeros para enfrentarse al rival y conseguir superar un desafío común. Todos ellos requieren captar información muy variada del entorno. Asimismo, la toma de decisiones debe ser rápida para escoger entre una gran cantidad de posibilidades. Del mismo modo que los factores o mecanismos de ejecución son decisivos a la hora de conseguir los objetivos. La concurrencia de percepción, toma de decisiones y mecanismos de ejecución convierten a este tipo de deportes en actividades complejas. Así, en los deportes de equipo las tareas son abiertas y el *feedback* externo y, por lo tanto, la información visual es fundamental para poder resolver la incertidumbre generada por la situación espacial de compañeros y adversarios en la pista y por la posición del móvil en cada momento.

El voleibol se diferencia de la mayoría de los deportes de equipo porque es un deporte de red, en el cual el móvil de juego sólo puede ser golpeado, nunca acompañado. En consecuencia, la ejecución de los movimientos se ve condicionada por el hecho de tener que superar la red y llevar el balón al otro lado del campo (Valadés Cerrato et al., 2013). El hecho de no poder sujetar el balón implicará un mayor y más complejo desarrollo de las habilidades técnicas y, a su vez, la calidad de la percepción visual deberá ser alta para que el movimiento del jugador coincida con el del móvil en el momento exacto y de la forma correcta. Por eso, aunque el voleibol es un deporte de habilidades discretas (Poulton, 1957), en el juego se genera una dinámica entre un patrón cíclico y secuencial (Beal, 1989) y secuencias de movimientos acíclicos, que requieren velocidad, potencia y resistencia para alcanzar un alto rendimiento (Bompa & Buzzichelli, 2017). Es posible, en definitiva, reconocer una secuencia repetitiva de acciones (Palao et al., 2004) en cada jugada.

Para conseguir un alto nivel de rendimiento en el juego durante la competición, el equipo debe tener el control sobre sus habilidades para evitar romper su secuencia y tratar, a su vez,

de romper la de sus oponentes. Estas habilidades se concretan en movimientos técnicamente complejos, ya que se componen de una suma de fuerza, velocidad, agilidad y precisión. Cada uno de estos componentes se formaliza a través de pequeños movimientos complejos que permiten sincronizar las acciones para golpear el balón de la forma deseada (Kumar & Kumar, 2020a). Debido a los diversos aspectos asociados a la biomecánica del voleibol, no todos los golpes de la pelota son ideales. Muchas veces, los errores cometidos por los deportistas se producen por la imposibilidad de ejecutar con éxito, de forma perfecta y repetida, la misma secuencia coordinativa con cada parte del cuerpo. En el desarrollo de la técnica correcta en el voleibol intervienen parámetros biomecánicos como el movimiento, el equilibrio y la estabilidad, la fuerza, las fuerzas de rotación y los movimientos parabólicos. Para perfeccionar un movimiento, entonces, se deben sincronizar los parámetros biomecánicos específicos con las técnicas que permiten que el movimiento se realice con fluidez (Kumar & Kumar, 2020a).

### **3.1. El remate en el voleibol**

En el voleibol, las acciones realizadas próximas a la red, como el remate y el bloqueo, son las que más influyen sobre el resultado del juego (Iglesias, 1994; Valadés Cerrato, 2005).

Considerando los tres tipos de acciones terminales (saque, bloqueo y remate), proporcionalmente, el remate es la más importante (Drikos et al., 2009). Los puntos logrados por el remate suponen más del 70% de los puntos logrados en competición. El remate es, por lo tanto, la acción técnica a través de la cual se consigue el mayor porcentaje de puntos (Palao et al., 2004; Zhang, 2000) y la que presenta una mayor correlación con el resultado final de los partidos (Cox, 1974; Díaz, 1996; Eom, 1989; Häyrynen et al., 2004, 2000; Marelic et al., 1998; McCughton, 1998; Moutinho, 2001; Palao et al., 2004; Santos, 1992), concluyendo así que la eficacia de la acción de remate es el factor más determinante en el juego y el que marca la diferencia entre los ganadores y los perdedores, independientemente del género (Valadés Cerrato, 2005). Por eso, algunos autores afirman que un equipo de voleibol sin un ataque contundente no puede lograr el éxito (Selinger & Ackerman, 1987).

El remate en el voleibol es una acción esencial que un jugador de nivel superior realiza un promedio de unas 40 000 veces por año (Kugler et al., 1996). Es una de las acciones técnicas cuya realización exitosa implica mayor complejidad y dificultad, por lo que lograr un dominio técnico en el remate resultará determinante (Carrero, 1973; Chung, 1988; Cisar & Corbelli,

1989; Haley, 1992; Madden, 1997; Zhelezniak, 1993). La necesidad de combinar la habilidad del salto vertical con una carrera previa y un golpeo final en suspensión aumenta la dificultad de la acción, haciéndola muy exigente a nivel de coordinación (Ureña, 1998).

El rendimiento obtenido en el remate viene determinado por la adecuada reproducción del modelo técnico básico, generando así un PM. Y para generar el PM más rentable, el deportista persigue la eficacia mecánica que le permita optimizar al máximo las posibilidades del cuerpo humano.

El modelo técnico básico del remate busca cumplir con dos objetivos mecánicos para la obtención del máximo rendimiento: conseguir la máxima altura de golpeo y lograr imprimir la máxima velocidad posible al balón (Bermejo et al., 2013; Coleman et al., 1993; Fuchs, Fusco, et al., 2019; Gutiérrez et al., 1992; Kumar & Kumar, 2020b).

Alcanzar una gran altura de golpeo a través de un gran salto le permite al deportista ganar impredecibilidad porque aumenta con ello la posibilidad de llevar a cabo acciones diversas. Cuanto mayor sea la altura de salto del deportista durante el remate, mayor será el espacio útil del campo y más pronunciada podrá ser la trayectoria del balón al golpearlo con intensidad. Por lo tanto, la altura del salto y la velocidad de golpeo son factores determinantes en el entrenamiento (Powers, 1996) y en la competición. Finalmente, hay que destacar que el rendimiento en el salto se correlaciona con el nivel de competencia (Sattler et al., 2015; Ziv & Lidor, 2010), tanto en mujeres como en hombres (Forthomme et al., 2005; Smith & Chamberlin, 1992; Ziv & Lidor, 2010).

El salto efectuado durante el remate es un movimiento muy específico y complejo. Su desempeño no está solo determinado por la fuerza y la potencia del deportista, sino que también está influenciado por la técnica y la coordinación (Fuchs, Fusco, et al., 2019). Los factores físicos (fuerza muscular y antropometría) y los factores de rendimiento medidos a través del análisis de movimiento (velocidad de aproximación, fuerza de reacción y potencia vertical) se han correlacionado con la altura máxima del salto (Aragón-Vargas & Gross, 2011; Dowling & Vamos, 1993; Fuchs, Fusco, et al., 2019; Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Ikeda et al., 2017; Kumar & Kumar, 2020b; Sheppard et al., 2007; Young et al., 1999).

A la técnica básica del remate se la denomina normalmente CBR, la cual genera un PM concreto. El grado de complejidad y la variabilidad de este PM está compuesto de unos

determinados esquemas motores que presentan, a su vez, unas determinadas interacciones funcionales (Van Emmerik & Van Wegen, 2002). Concretamente, la CBR contiene 6 esquemas motores distintos integrados en el gesto técnico: 1) dirección en el plano horizontal; 2) profundidad de golpeo; 3) lectura de la trayectoria del balón; 4) control de la carrera; 5) tiempo de ataque y 6) movimiento de cierre de la muñeca (Bisagno & Morra, 2018). El estudio y la comprensión de la interacción de los esquemas motores de la CBR es importante para el desarrollo de los programas de formación (Serrien et al., 2016a).

## **3.2. Descripción de la técnica de la carrera batida de remate**

Cuando se habla de rendimiento en el remate se sobreentiende que la CBR es con balón. No obstante, tanto en el aprendizaje como en el juego se producen CBR sin balón, dando por sentado que seguirán el mismo PM, ya que se usa el mismo modelo técnico para ambas situaciones. En este apartado se describe detalladamente el modelo técnico de la CBR, ayudando a matizar las diferencias encontradas en los estudios analizados de la CBR con balón y los que lo han hecho sin balón.

### **Técnica básica**

La CBR consta de tres partes (diferenciadas en dos fases, una terrestre y una aérea): 1) la preparación para el despegue (fase terrestre); 2) salto y golpeo (fase aérea); 3) aterrizaje después del golpeo (fase terrestre). Estas fases se desarrollan mediante 6 esquemas motores: dirección en el plano horizontal, lectura de la trayectoria del balón y control de la carrera durante la fase terrestre, y profundidad de golpeo, tiempo de ataque y movimiento de cierre de la muñeca (Bisagno & Morra, 2018) durante la fase aérea. El objetivo prioritario de la CBR es conseguir la máxima altura posible del centro de gravedad para poder golpear el balón en el punto más alto posible. Cuanto mayor sea la altura del golpeo, mayor será la posibilidad de sobrepasar la red y el bloqueo del adversario.

Para la secuencia temporal del PM de la CBR, algunos autores distinguen 4 fases: 1) fase de aproximación; 2) fase de salto; 3) fase de ataque; 4) fase de continuación o caída (Abendroth-Smith & Kras, 1999; Cisar & Corbelli, 1989; Hernández, 1992; Ivoilov, 1986). Otros autores han descrito de forma algo diferente estas 4 fases de la CBR: 1) fase de aproximación; 2) fase de

batida; 3) despegue y vuelo; 4) aterrizaje (Chen et al., 2011; Reeser et al., 2010; Tilp et al., 2008; Wagner et al., 2009). Por otro lado, Gutiérrez et al (1992) describen 5 fases: 1) fase de aproximación; 2) fase de batida; 3) fase de despegue; 4) fase de vuelo y acción del golpeo; 5) fase de aterrizaje y recuperación. En cambio, Coleman et al (1993) describen 6 fases: 1) fase de aproximación; 2) fase de batida; 3) fase de despegue; 4) vuelo (incorporando los movimientos de preparación para el golpeo); 5) fase de golpeo; 6) aterrizaje.

Recientemente, Valadés (2005) ha propuesto describir la CBR también en 5 fases: 1) carrera de aproximación; 2) batida (salto); 3) preparación del golpeo; 4) golpeo, y 5) caída. Finalmente, algunos autores describen 5 fases, diferenciando cada paso de la CBR: 1) fase de aproximación (1.º paso: paso de orientación); 2) fase de batida (2.º paso: impulso de frenado); 3) fase de despegue (3.º paso: impulso de aceleración); 4) fase de vuelo (incluye el movimiento para el golpeo); 5) fase de aterrizaje (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Ikeda et al., 2017).

En esta tesis doctoral hemos utilizado una descripción en 5 fases adaptando la propuesta por Valadés en 2005 con la propuesta por Fuchs, Menzel et al. en 2019a. Esta propuesta nos permite integrar de forma detallada cada paso de la CBR y poder describir las fuerzas de impacto resultantes en el transcurso de las 5 fases. Por esta razón ha sido la propuesta utilizada para analizar la CBR en los estudios realizados en esta tesis doctoral 1) fase de carrera de aproximación (1.º paso: paso de orientación ( $a1$ )); 2) fase de batida (2.º paso: impulso de frenado ( $a2$ ), y 3.º paso: impulso de aceleración ( $a3$ )); 3) preparación del golpeo; 4) golpeo ( $a4$ ); 5) fase de aterrizaje ( $a5$ ) (Figura 1).



Figura 1: Fotoseriación de la CBR completa con balón, con las fases detalladas en la propuesta de esta tesis.

A continuación, describiremos para cada fase los siguientes apartados: A) objetivo perseguido; B) inicio y final; C) descripción de la ejecución técnica; D) aspectos cinemáticos más relevantes; E) aspectos claves del movimiento, y F) la CBR sin balón.

### 3.2.1. Fase de carrera de aproximación

A) **Objetivos.** La carrera de aproximación se realiza para conseguir dos objetivos: alcanzar la velocidad horizontal adecuada para transformarla en velocidad vertical que permita lograr la máxima altura en el salto y posibilitar la máxima precisión en el salto respecto a la trayectoria del balón (Abendroth-Smith & Kras, 1999; Ivoilov, 1986; Shahbazi & Mirabedi, 2008; Wagner et al., 2009; Zhang Huan, 1999).

Se considera que la velocidad adecuada de la carrera de aproximación debe ser cercana al 50-60% de la velocidad máxima de *sprint* del jugador (Huang et al., 1998). El estudio de Ciapponi, McLaughlin y Hudson (1996) señala que deportistas experimentados consiguen una velocidad horizontal de 8,3 km/h. Selinger y Ackerman (1985) afirman que una aproximación eficiente puede añadir de 12,7 a 20,3 cm a la altura del salto del deportista. En este sentido cabe resaltar que en estudios recientes realizados con jugadoras de voleibol no se encuentra correlación entre la velocidad horizontal y la altura del salto (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Hsieh & Christiansen, 2010).

B) **Inicio y fin.** Se inicia con un primer paso de ajuste (primer paso:  $a_1$ ) y finaliza con el penúltimo apoyo (segundo paso:  $a_2$ ) antes del despegue del suelo (Figura 2).

La duración de esta fase está determinada por las características de la trayectoria del balón, pues la carrera de aproximación debe ajustarse a dicha trayectoria precisando el momento del salto según la posición del balón (Ivoilov, 1986; Sardinha & Bootsma, 1993).



Figura 2. Fotoseriación de la carrera de aproximación.

C) **Ejecución técnica.** La velocidad de aproximación se incrementa gradualmente, al igual que la longitud de los pasos (Abendroth-Smith & Kras, 1999). El inicio es abrupto y forzado por la trayectoria adoptada por el balón en la colocación (Lobietti, 2010).

En la fase inicial, el jugador realiza uno o dos pasos preparatorios, mientras observa la trayectoria del balón. Una vez determinada la trayectoria de vuelo del balón, corrige su velocidad de movimiento, calculando el lugar y el momento en el que realizar el salto para interceptar el balón (Ivoilov, 1986).

La carrera puede ser de forma oblicua o perpendicular hacia la red, dependiendo del lado por el que se realice el ataque y de la lateralidad del jugador, en función de cuál sea su brazo dominante (Figura 3). Así, un/a deportista diestro/a, cuando remate por la izquierda (zona IV), realizará una carrera oblicua de 45-60 grados respecto a la red. En cambio, cuando remate por la derecha (zona II), realizará una carrera más o menos perpendicular, de unos 60-90 grados. Esta orientación permite al/la deportista poder dirigir el balón con fuerza a cualquier ángulo del campo. Una jugadora zurda hará estas carreras descritas de forma opuesta a la diestra (Bertucci et al., 1987; Haley, 1992).

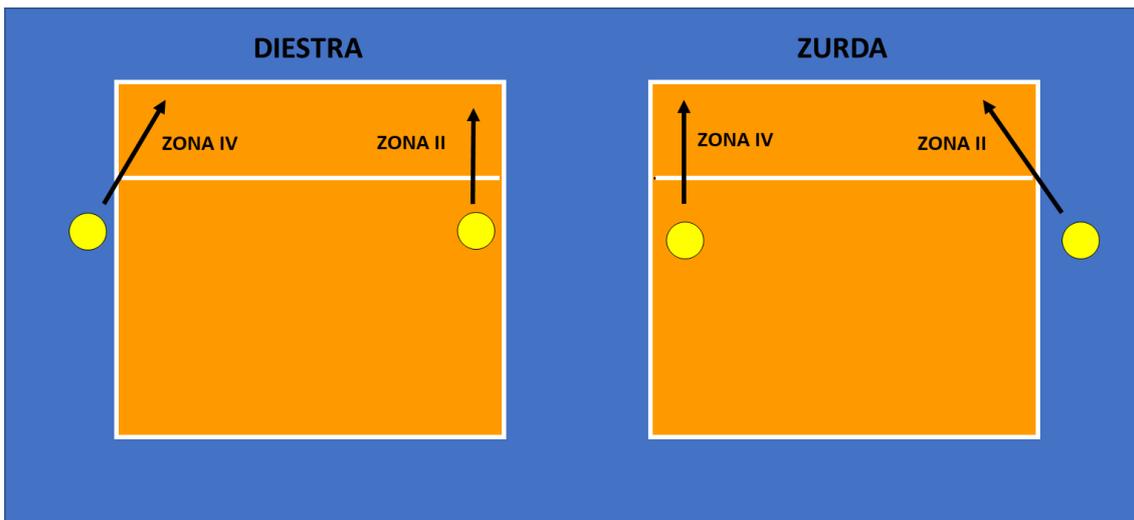


Figura 3. Diferencias entre las trayectorias de una jugadora diestra y otra zurda para realizar un ataque por las zonas IV y II.

D) **Aspectos cinemáticos.** La velocidad horizontal desarrollada durante esta fase le sirve al/la deportista para incrementar la fuerza que los pies ejercen contra el suelo en la siguiente fase. Dicha fuerza también provocará un aumento de la activación en el ciclo estiramiento-acortamiento y todo ello con el objetivo de incrementar el impulso en la componente vertical del salto (Abendroth-Smith & Kras, 1999; Ciapponi et al., 1996; Coleman et al., 1993; Gutiérrez et al., 1992; Padial, 1994). Una mayor altura en el salto en la CBR se consigue mediante un acercamiento energético que se refleja, en primera instancia, en  $a1$  (paso de orientación), posteriormente en  $a2$  (paso de impulso de frenado) y finalmente en  $a3$  (paso de impulso de aceleración) (Fuchs, Fusco, et al., 2019). El valor de  $a1$  condiciona la velocidad de aproximación y la capacidad de transformar esta energía en altura en el salto (Fuchs, Menzel, et al., 2019a).

E) **Aspectos clave del movimiento.** Mediante la carrera de aproximación, el/la jugador/ora debe ajustar la salida y la velocidad, así como determinar el lugar de realización del salto de acuerdo con la trayectoria del balón (Lobiatti, 2010; Zahálka et al., 2017).

La orientación de la carrera, descrita anteriormente, determinará la posición final del cuerpo respecto a la red. Esta posición incidirá sobre la eficacia de la fase posterior, al permitir el desarrollo completo de la “cadena cinemática” del golpeo, que describiremos posteriormente (Gutiérrez et al., 1992).

La velocidad de aproximación en la CBR fue comparativamente menor en mujeres que en hombres. Esta diferencia puede ser atribuida, en parte, a las diferencias en la ejecución técnica de la CBR, o bien por una necesidad menor de velocidad (Hsieh & Christiansen, 2010). Además,

los menores ángulos de la rodilla y la menor inclinación de la parte superior del cuerpo son factores que reducen la altura de salto en la CBR de las jugadoras (P. Chen et al., 2011).

Sin embargo, la velocidad de aproximación se define después del empuje del paso de orientación de forma irreversible, pudiendo obstaculizar una conversión completa hacia el despegue. De este modo, la longitud del paso es una de las herramientas para una conversión exitosa y se puede adaptar a la velocidad de aproximación durante el paso de orientación. La longitud de este paso, que muestra una mayor correlación en el resultado del salto con la velocidad horizontal (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Ikeda et al., 2017; Liu et al., 2001), aumenta la relevancia de alcanzar una velocidad de aproximación optimizada para tener la capacidad de convertirla de forma exitosa (Fuchs, Fusco, et al., 2019).

F) **La CBR sin balón.** En la CBR sin balón el deportista no tiene que coordinarse con la trayectoria del balón, por lo que los pasos pueden realizarse a máxima velocidad y conseguir más altura en el salto.

### 3.2.2. Fase de batida

A) **Objetivos.** En esta fase, el jugador realiza los ajustes necesarios para conseguir la máxima velocidad vertical, aprovechando la velocidad horizontal generada en la fase anterior (Abendroth-Smith & Kras, 1999; Coleman et al., 1993; Gutiérrez et al., 1992; Ikeda et al., 2017; Jandova & Janura, 2019; Kumar & Kumar, 2020b; Shahbazi & Mirabedi, 2008; Ureña Espá, 1998; Wagner et al., 2009; Zahálka et al., 2017).

Esta fase está compuesta de dos subfases (Figuras 4 y 5): *a*) el impulso de frenado ( $a_2$ ), y *b*) el impulso de aceleración ( $a_3$ ). El objetivo del impulso de frenado es convertir la velocidad horizontal alcanzada en la fase anterior en velocidad vertical, mientras que el objetivo del impulso de aceleración es generar la máxima velocidad vertical.



Figura 4. Fotoseriación de la fase de batida del remate. Impulso de frenado en la primera instantánea e impulso de aceleración en las dos siguientes.

B) **Inicio y fin.** Comienza con la realización del penúltimo apoyo de la carrera y finaliza en el momento del despegue de los dos pies del suelo (Figura 5). Esta fase incluye el último paso de la carrera, el cual se realiza en profundidad.

La suma de las dos subfases que la componen tiene una duración que oscila entre 0,30 s y 0,37 s (Ciapponi et al., 1996; Gutiérrez et al., 1992; Vint et al., 1996).

a) El impulso de frenado ( $a_2$ ) comienza con el penúltimo apoyo de la carrera y finaliza en el momento de máxima flexión de las piernas. Tiene una duración aproximada que oscila entre 0,17 y 0,19 s.

b) El impulso de aceleración ( $a_3$ ) comienza en el momento de máxima flexión de las piernas para finalizar en el momento en que los pies despegan del suelo, con una duración aproximada que oscila entre 0,13 y 0,18 s.

C) **Ejecución técnica.** En la ejecución de la batida se distinguen dos subfases. Comienza con el impulso de frenado y finaliza con el impulso de aceleración, despegándose del suelo.

a) El impulso de frenado se inicia cuando se produce el apoyo del talón del pie del mismo lado que el brazo que ejecutará el remate. La pierna comienza la subfase de frenado ligeramente extendida y después, a medida que se va produciendo su flexión para frenar la velocidad horizontal de la carrera de aproximación, realiza el segundo apoyo. El pie contrario al brazo ejecutor se sitúa ligeramente adelantado al anterior, dejando el cuerpo y las caderas orientados hacia el colocador (ataque por zona IV). Cuando se ha llegado al momento de máxima flexión de piernas, comienza el impulso de aceleración (Figura 4).

En deportistas avanzados/as, el apoyo del pie contrario al brazo ejecutor se realiza con una ligera rotación interna, lo que permite a los/las deportistas una mejor conversión de la velocidad horizontal en vertical (Ciapponi et al., 1996; Hsieh & Christiansen, 2010).

b) El impulso de aceleración se produce mediante una rápida extensión de las piernas, al fin de generar la mayor velocidad vertical posible en la realización del salto.

Durante la fase de la batida, la secuencia de movimientos de brazos contribuye a incrementar la altura del salto (Feltner et al., 1999). Inicialmente, durante el impulso de frenado, se realiza una extensión de hombros, desplazando los brazos hacia atrás; posteriormente, se realiza una flexión de hombros, llevando los brazos hacia delante para terminar, durante el impulso de aceleración, con una flexión de hombros, dirigiendo los brazos hacia arriba (Figura 5).

D) **Aspectos cinemáticos.** La batida es el último eslabón de la carrera de aproximación y se caracteriza por realizarse en profundidad. Esta situación provoca que el centro de gravedad (CdG) quede bajo y retrasado.

a) En el impulso de frenado, los pies empujan contra el suelo para obtener unas fuerzas de reacción que le permitan frenar la cantidad de movimiento desarrollado durante la carrera previa. El ángulo final de flexión de las rodillas es importante para el resultado final del salto (Padial, 1994). Este ángulo se sitúa entre 100° y 115° para deportistas que pueden desarrollar una elevada potencia con las extremidades inferiores, y de 120° a 130° para aquellos que generan menos potencia (Ivoilov, 1986). Por otra parte, Hernández (1992) nos habla de un ángulo de 90° a 110° para deportistas avanzados y de un ángulo de 110° a 130° para deportistas menos avanzados.

El impulso de frenado provoca la acción excéntrica de la musculatura extensora de la cadera, rodillas y tobillos. Durante esta acción muscular se produce el estiramiento de los componentes elásticos musculares, almacenándose en forma de energía cinética, que contribuye a la consecución de un mayor impulso neto de la componente vertical del salto durante la fase de impulso de aceleración (Gutiérrez et al., 1992). En este sentido, es importante resaltar que en las mujeres se produjo una correlación entre la altura del salto y la desaceleración de la velocidad horizontal del centro de gravedad durante la fase de la batida en el impulso de frenado

(a2), lo que supone una menor eficiencia para desacelerar y convertir la velocidad horizontal en vertical (Ikeda et al., 2017).

El movimiento inicial de los brazos hacia atrás y hacia arriba en esta fase, con la extensión de hombros y codos, favorece la posición retrasada y baja del centro de gravedad (Figura 5). La extensión de hombros no debe superar los 45°, pues un ángulo mayor provocaría una inclinación del torso hacia delante que reduciría la altura del salto (Haley, 1992; P. F. Vint, 1998). El posterior movimiento pendular de brazos hacia abajo y hacia adelante, durante la fase intermedia de la batida, incrementa la fuerza corporal contra el suelo, lo cual favorecerá la altura del salto según la ley de acción y reacción de Newton. Con este movimiento, además, se favorece el estiramiento de los elementos elásticos de la musculatura extensora de cadera y rodillas, al incrementar la tensión generada durante la acción excéntrica (Ikeda et al., 2017; Jandova & Janura, 2019; Kumar & Kumar, 2020a) (Figura 5).

Este movimiento tiene mayor importancia en las mujeres ya que el balanceo de brazos de las mujeres no es tan agresivo como el de los hombres (Sattler et al., 2015). Las diferencias en el balanceo de los brazos entre hombres y mujeres afecta de forma muy notable a la altura del salto (Lees et al., 2004).

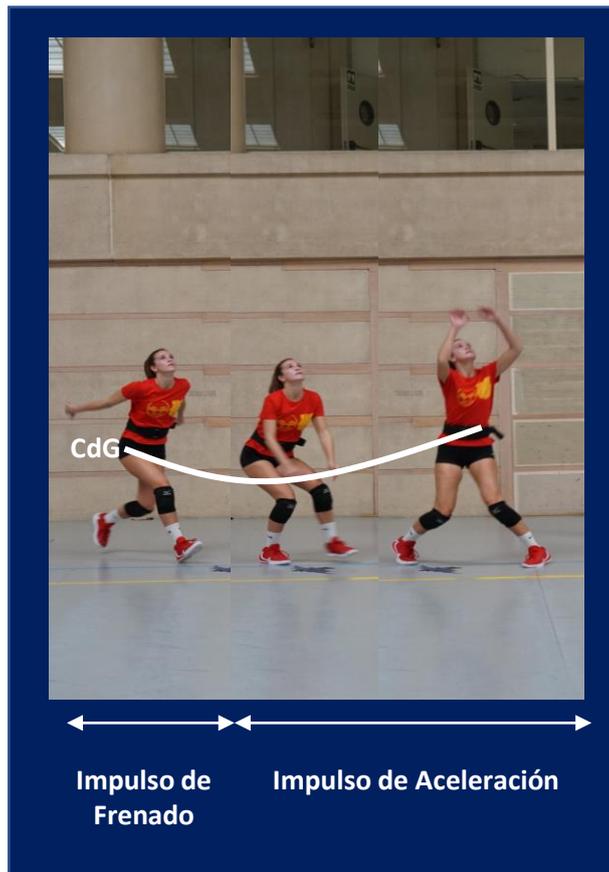


Figura 5. Subfases de impulso de frenado y aceleración (adaptado de Fuchs, 2019a).

b) En el impulso de aceleración se produce la acción muscular concéntrica de la musculatura extensora de caderas, rodillas y tobillos. La fuerza generada por esta acción muscular, sumada a la fuerza de reacción generada durante el impulso de frenado y a la almacenada por los factores elásticos de la musculatura, determinarán el impulso vertical del salto. El movimiento pendular final de brazos hacia delante y hacia arriba (Figura 5) produce un aumento de la altura del centro de masa corporal respecto al suelo que, a su vez, propicia el aumento de la altura del salto (Feltner et al., 1999; Gutiérrez et al., 1992; Vint et al., 1996; Wielki & Dangre, 1985; Wilkerson, 1985).

E) **Aspectos clave.** Los estudios biomecánicos realizados sobre el salto en el remate realizados por Wielki y Dangre (1985) y Wilkerson (1985) muestran la importancia de la velocidad vertical generada por las extremidades inferiores y resaltan el papel relevante de los movimientos corporales del tren superior respecto a la altura final del salto. Otro aspecto clave en esta fase, y que influye en la ejecución posterior, es la posición adoptada de doble apoyo con el pie contrario al brazo ejecutor adelantado. Esta posición sitúa las caderas de los/las deportistas con una orientación de unos  $45^\circ$  respecto a la red, lo cual facilita el golpeo.

El/la deportista debe quedar situado ligeramente por detrás del balón para poder golpearlo con comodidad. Además, el balón debe quedar por delante del hombro del brazo ejecutor. Esta posición posibilitará realizar el remate de potencia hacia todas las direcciones (diagonal, línea, etc.). Si el balón queda demasiado escorado hacia uno de los laterales del brazo ejecutor dificulta, y en algunos casos imposibilita, la realización de un remate de potencia hacia el lado opuesto (Chung, 1988; Selinger & Ackerman, 1987). Además, conseguir la mayor altura posible, y con una ligera anticipación a la llegada del balón, permite mantenerse durante más tiempo en el aire, lo que permite disponer de más tiempo para decidir cómo y hacia dónde golpear el balón, aumentando las probabilidades de éxito del remate (Sarvestan et al., 2020).

F) **La CBR sin balón.** En la CBR sin balón el deportista no tiene que coordinarse con la trayectoria del balón, incrementando la fluidez del movimiento en su globalidad (Ikeda et al., 2017).

### 3.2.3. Fase de preparación del golpeo

A) **Objetivo.** Durante esta fase aérea los deportistas deben acelerar al máximo la mano de golpeo.

B) **Inicio y fin.** Esta fase abarca desde el momento de despegue del suelo hasta el momento de contacto de la mano con el balón (Figura 6). En el estudio realizado por Chung (1988), con mujeres de bajo nivel deportivo, se registró una duración media de 0,34 s; en cambio, en el estudio realizado por Gutiérrez et al. (1992), con deportistas de élite, se registró una duración media de 0,27 s.

En esta fase del remate, de acuerdo con el análisis de los movimientos realizados por el brazo de golpeo, se distinguen tres partes (Figura 7) (Reeser et al., 2010; Rokito et al., 1998):



Figura 6. Fotoseriación de la fase de preparación del golpeo.

a) Subfase de preparación o *wind-up*: comprende desde el despegue de los pies del suelo hasta el comienzo de la rotación externa del hombro. En el estudio de Rokito et al. (1998) se obtiene una duración media de esta fase de 0,37 s.

b) Subfase de armado o *cocking*: comienza con la rotación externa del hombro del brazo ejecutor y finaliza al empezar la rotación interna de dicho brazo. En esta subfase, Rokito et al. (1998) estiman una duración media de 0,25 s y Chung (1988), en un estudio con deportistas noveles, establece una duración media de 0,29 s desde el despegue hasta la máxima rotación externa del brazo.

c) Subfase de aceleración: comienza con la rotación interna del hombro del brazo ejecutor y termina en el momento del contacto con el balón. Chung (1988) indica una duración media de 0,05 s y Rokito et al. (1998) encuentran una duración media de 0,09 s.

C) **Ejecución técnica.** Todos los movimientos que se realizan en esta fase tienen como objetivo obtener la máxima aceleración posible en la mano de golpeo (Madden, 1997).

En la subfase de preparación (a) se realizan los movimientos necesarios para adoptar la posición idónea para optimizar el golpeo. En la subfase de armado (b), a esta posición idónea se la denomina “arco tenso” (Gutiérrez et al., 1992; Ivoilov, 1986) (Figura 7). En la subfase de

aceleración (c) se producen los movimientos finales para el golpeo, que comienzan en la cadera y finalizan en la mano.

a) Subfase de preparación o *wind-up*: tras el despegue del suelo, la cadera se extiende hacia el lado del brazo ejecutor. El codo del brazo que no realiza el golpeo se eleva hacia delante, mientras que el codo del brazo que sí realiza el golpeo se mueve hacia arriba y hacia atrás. Al mismo tiempo, se eleva la cabeza y se flexionan las piernas. Estos movimientos provocan el arqueamiento progresivo del tronco.

b) Subfase de armado o *cocking*: en este momento el cuerpo del jugador adopta la posición de “arco tenso” (Figura I-10), es decir, piernas flexionadas, tronco arqueado, brazo no ejecutor extendido y elevado, y brazo ejecutor flexionado con una rotación externa pronunciada.

El tipo de armado que hemos descrito se conoce como *bow and arrow*, “arquero” (Cisar & Corbelli, 1989), o estilo tradicional con elevación (Oliveira et al., 2020; Seminati et al., 2015). Este movimiento del brazo recuerda al realizado por un arquero en el momento de tensar la cuerda, aunque en este caso el brazo está algo más elevado. No obstante, también se puede realizar el armado circular o armado estilo alternativo (Oliveira et al., 2020; Seminati et al., 2015).

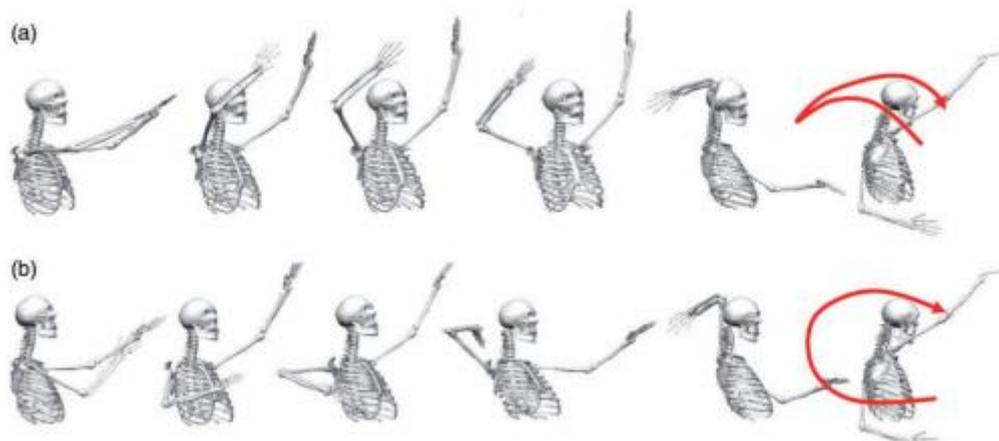


Figura 7. Armado tradicional, de elevación o de arquero (a). Armado alternativo o circular (b) (adaptada de Oliveira, 2020).

c) Subfase de aceleración: comienza con el encadenamiento segmentario de la cadena cinemática del golpeo. Primero, la cadera del brazo ejecutor se mueve hacia delante y ligeramente hacia arriba, produciéndose un pre-estiramiento tridimensional del torso. A continuación, el hombro del brazo ejecutor, ayudado por el pre-estiramiento del torso, comienza a rotar hacia delante y arriba, transfiriéndose ahora el pre-estiramiento a la musculatura de la parte superior del pecho y del hombro, tras dejar retrasado el brazo.

La velocidad del hombro se transfiere al codo, que comenzará su movimiento a la altura de la oreja, mientras se crea un pre-estiramiento del tríceps al dejar caer la mano hacia atrás, a la altura del cuello.

El pre-estiramiento del tríceps sirve para crear una mayor velocidad en la extensión del codo, llevando el antebrazo por encima del mismo, mientras se crea un pre-estiramiento en la muñeca, al llevarse la mano hacia atrás.

Toda la energía generada desde el inicio del movimiento en la cadera es transferida a la mano a través de la muñeca, que envuelve a la pelota para otorgarle la máxima velocidad posible.

De forma simultánea al encadenamiento de los segmentos que componen la cadena cinemática del golpeo, descrita para el brazo ejecutor, se produce la extensión de piernas y el movimiento complementario, de arriba hacia delante y hacia abajo, del brazo que no golpea al balón.

**D) Aspectos cinemáticos.** La justificación de los movimientos, realizados para alcanzar la máxima velocidad posible en la mano de golpeo, parte del principio de transferencia del momento cinético o angular (Ecuación 1).

$$H = I * \omega \rightarrow H = [\sum_{i=1}^n (m_i * r_i^2) * \omega_i] \quad (1)$$

Ecuación 1. Principio de transferencia del momento angular. Donde  $H$  es el momento angular del cuerpo,  $I$  es el momento de inercia, que depende de la masa  $m$  y del radio  $r$  de giro de cada uno de los segmentos, y  $\omega$  es la velocidad angular segmentaria respecto al centro de gravedad total del cuerpo.

Según este principio, cada uno de los momentos angulares desarrollados en el salto, permanece constante una vez que el deportista despegas del suelo (Gutiérrez et al., 1992). Este principio justifica la importancia de la orientación de las caderas en el momento de la batida, instante en el que se genera el momento angular.

Si el momento angular debe permanecer constante, pero la masa de cada una de las partes del cuerpo que actúa en la cadena cinemática del golpeo es secuencialmente más pequeña, la velocidad angular de cada parte del cuerpo (cadera, tronco, brazo, antebrazo y mano) se irá incrementando (Figura 8).

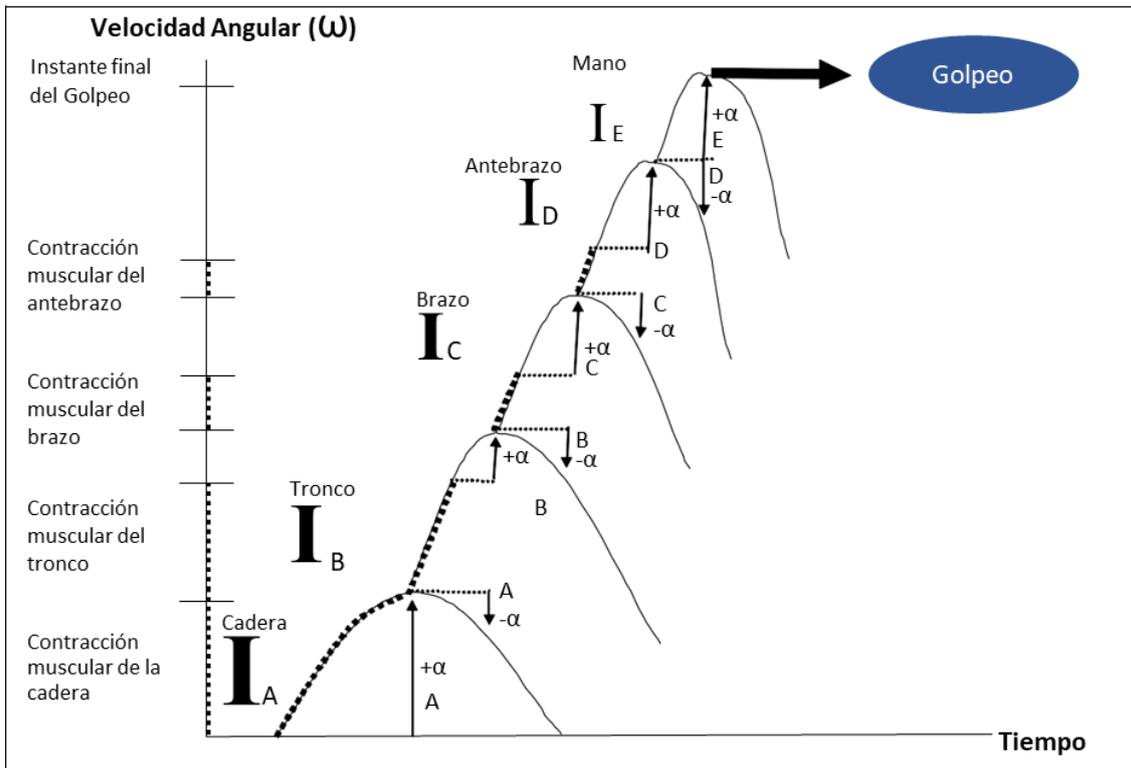


Figura 8. Representación del incremento de la velocidad angular durante la cadena cinemática del golpeo en el remate (Valadés Cerrato, 2005).

El principio de transferencia del momento angular también justifica la acción de las piernas en la fase aérea. Los movimientos realizados por el tren inferior tienen como objetivo compensar los realizados por el tronco y los brazos (Gutiérrez et al., 1992).

E) **Aspectos clave.** La velocidad final de la mano estará determinada por la adecuada coordinación de cada uno de los grupos musculares que intervienen en la cadena cinemática del golpeo (Gutiérrez et al., 1992; Madden, 1997).

Para la velocidad del remate, la generación de impulso en la pelvis y el torso, así como la transición a grandes velocidades angulares en la rotación y flexión internas del hombro y la extensión del codo, son esenciales (Wagner et al., 2014).

Por orden de importancia, Vint (1995) indicaba que la velocidad que la mano le transmitía al balón dependía en un 46% de la extensión del codo, en un 20,5% de la rotación del hombro, en un 14,5% de la actuación de rotación del pecho, en un 7,5% del desplazamiento hacia delante del centro de gravedad durante el salto, y en un 5,5% de la flexión de la muñeca. El restante 6% dependía de otros factores.

La adecuada participación secuencial en el tiempo favorece la activación del ciclo estiramiento-acortamiento de cada grupo muscular, incrementándose la velocidad final de la

mano (Gutiérrez et al., 1992). Esta activación del ciclo estiramiento-acortamiento se produce también en otras disciplinas deportivas con la utilización de cadenas cinemáticas similares, como el lanzamiento de balonmano (Jöris et al., 1985; Serrien et al., 2018; Wagner et al., 2012), el lanzamiento de jabalina (Campos, 1993), el golpeo de kárate (Voigt & Klausen, 1990) o el saque de tenis (Wagner et al., 2012).

Otro aspecto clave en esta fase es el movimiento realizado por el brazo que no golpea el balón. La posición flexionada y abducida es importante para seguirle la pista y enfocar la mirada en él, al igual que para facilitar la rotación lateral del tronco para alcanzar la posición de arquero.

Un aspecto clave para las jugadoras es que consiguen mantener la pelvis estable y pueden cambiar la inclinación del cuerpo de atrás hacia adelante muy rápidamente. Esta diferencia respecto a los hombres podría ser una estrategia aprendida por las jugadoras por el hecho de mantenerse menos tiempo en el aire, por no alcanzar tanta altura en el salto o debido a las diferencias en las propiedades inerciales de ambos segmentos (Serrien et al., 2016a).

La coordinación de todos los movimientos será clave para conseguir una mayor velocidad en el golpeo del balón. En el caso de las fases de aproximación y de batida, una mayor fuerza y potencia muscular puede ayudar significativamente en la altura del salto. En el caso del golpeo del balón, una mayor potencia de los brazos no significará una mayor velocidad resultante en el golpeo (Valadés Cerrato et al., 2016).

F) **La CBR sin balón.** Puesto que no hay que golpear el balón, se modifican las características de los movimientos en la subfase de aceleración, dejando caer el brazo a una velocidad menor. La subfase de armado presenta pocos cambios o modificaciones en comparación con la CBR con balón.

### 3.2.4. Fase de golpeo

A) **Objetivos.** Conseguir la máxima altura y velocidad posible en el golpeo, que serán los dos parámetros más determinantes para la eficacia del remate.

B) **Inicio y fin.** Comienza en el momento en el que la mano entra en contacto con el balón y finaliza tras la pérdida de contacto (Figura 9). Gutiérrez et al. (1992) contrastan, en su estudio con deportistas de élite, una duración de 0,120 s. Otro estudio, realizado por Christopher (2001), establece una duración de 0,097 s en hombres, y de 0,081 s en mujeres de la liga americana de voleibol.



Figura 9. Fotoseriación de la fase de golpeo del remate.

El contacto con la pelota se produce con un ángulo en el hombro de 170-140° según Kugler et al. (1996) y con un ángulo medio de 157,6°, según Gutiérrez et al. (1992).

C) **Ejecución técnica.** La fase de golpeo es la culminación de la subfase de aceleración. En ella se completa la extensión del codo y se continúa el movimiento del brazo hacia delante y hacia abajo. Durante esta fase se realizan también los movimientos compensatorios del tren inferior, produciéndose la extensión de rodillas y la flexión con rotación medial del tronco.

A la hora de realizar el golpeo al balón, según Haley (1992), hay que colocar la mano en forma de copa, con los dedos juntos. Esta posición de la mano permite asegurar el control del balón y transmitirle la máxima velocidad posible. Golpear el balón con la mano abierta y los dedos muy separados permite mayor control sobre la dirección del balón, pero va en detrimento

de la velocidad transmitida (Ivoilov, 1986). Para cambiar la dirección del remate se puede llevar a cabo una rotación interna o externa de la articulación glenohumeral en la parte más alta del impacto o golpear el balón ligeramente ladeado; ambas situaciones reducirán la velocidad resultante del balón (Tabor et al., 2018).

Durante el golpeo se realizará también un movimiento de flexión de la muñeca. Dicho movimiento no comporta un aumento de la velocidad de salida del balón, pero favorece que la mano contacte con la parte superior de este, provocando su rotación hacia delante (Gutiérrez et al., 1992; Kao et al., 1994).

Una vez que la mano pierde el contacto con el balón, se produce la desaceleración del brazo. Esta acción es importante para que el brazo no choque con el cuerpo del jugador (Rokito et al., 1998).

**D) Aspectos cinemáticos.** La velocidad del balón en el remate es directamente proporcional a la velocidad de la mano (P. Vint, 1995). Durante el golpeo, es preciso reducir la pérdida de energía. La energía perdida en el contacto depende de las características de deformación tanto de la mano como del balón. Cuanto más rígida esté la mano y más duro el balón, menos energía se perderá en el golpeo (Ivoilov, 1986). Este hecho justifica otra vez la posición de la mano en forma de copa y con los dedos juntos durante el golpeo, propuesta por Haley (1992), puesto que si la mano estuviese abierta y con los dedos separados, reduciría su rigidez.

Aunque, desde el punto de vista de la cinemática, la velocidad aplicada al balón sería máxima si la línea de fuerza aplicada pasase por el centro de gravedad del balón, es necesario contar con el “efecto Magnus” (Ivoilov, 1986; Kao et al., 1994). Este efecto se fundamenta en el rozamiento que el aire del ambiente produce en el balón. Si le aplicamos al balón una rotación hacia delante, conseguiremos que este rozamiento favorezca una trayectoria más rápida hacia el suelo.

Para lograr imprimir al balón una rotación hacia delante sobre su eje horizontal, hay que realizar el golpeo en su parte superior y acompañar el movimiento con una flexión de muñeca (Gutiérrez et al., 1992). La acción de la flexión de la muñeca y una mayor velocidad del balón serán los factores que marquen la diferencia entre los deportistas expertos y los noveles (Serrien et al., 2016b).

En un golpeo efectivo, en hombres, el balón alcanza velocidades entre los 90 y los 100 km/h de promedio (Coleman et al., 1993; Forthomme et al., 2005; Tabor et al., 2018),

dependiendo del nivel de juego de los deportistas y de la zona del campo desde la que se realice el remate.

E) **Aspectos clave.** En esta fase se consuman los dos objetivos mecánicos del remate: alcanzar la máxima altura de golpeo y alcanzar la máxima velocidad. Para cumplir el primer objetivo será necesario que, en el inicio del golpeo, el cuerpo esté totalmente extendido y perpendicular al suelo (Figura 10), sin perder altura por posiciones no deseadas (Vint, 1998).

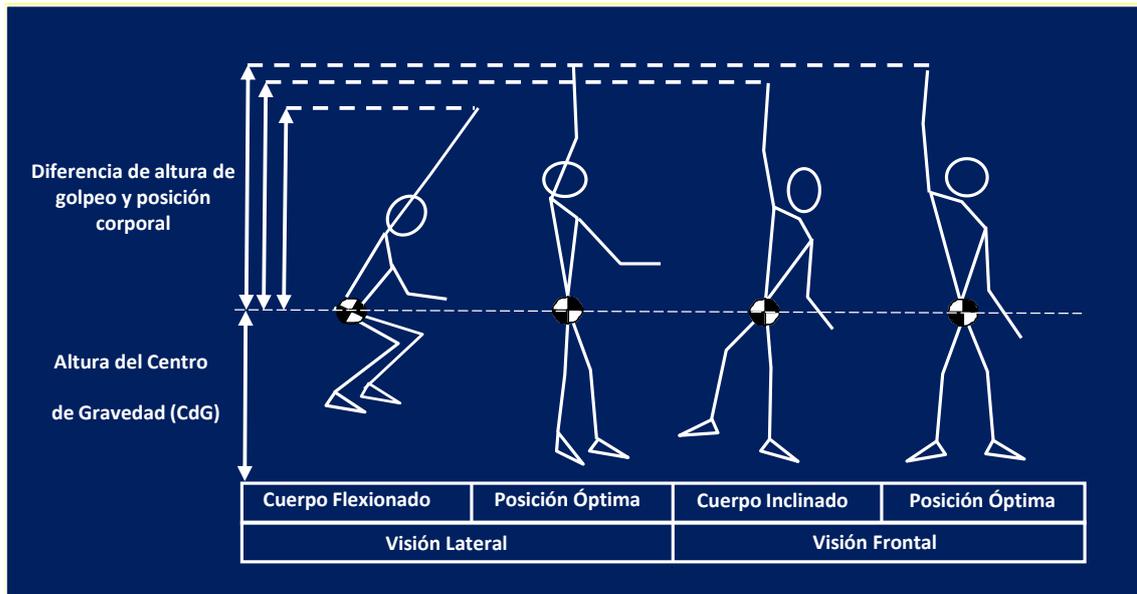


Figura 10. Diferencia de altura de golpeo en función de la posición corporal (modificado de Vint,1998).

Para cumplir con el segundo objetivo es preciso que se realice el contacto tal y como lo hemos descrito anteriormente (ver apartado C). Además, el balón debe estar situado ligeramente por delante del jugador y del lado del brazo de golpeo. Lograr esta ubicación dependerá, sobre todo, de la carrera previa y del lugar de batida escogido.

Hay todavía otros detalles que resultan clave en la fase de golpeo y que se van puliendo a medida que el deportista va aumentando su nivel. Algunos deportistas consiguen iniciar más temprano la extensión del codo y, consiguientemente, golpean el balón con el codo más extendido. Un codo extendido ejercerá menos tensión sobre el hombro cuando comience la rotación interna de este, porque el momento de inercia será menor (Hong et al., 2001). Esta misma estrategia se observa también en el lanzamiento de balonmano y en el saque de tenis (Serrien et al., 2015; Wagner et al., 2012). En el caso de los deportistas de voleibol expertos, estos conseguirán más altura en el golpeo gracias a su mayor extensión del codo (Serrien et al., 2016a).

Desde el punto de vista estratégico, flexionar el codo rápidamente después del golpeo de remate, volviendo a la normalidad, permitirá al deportista recuperar la posición inicial y estar preparado inmediatamente para la siguiente fase del juego. No obstante, los deportistas noveles y las jugadoras expertas paran el codo después del impacto con el balón, manteniendo el codo extendido (Serrien et al., 2016a).

Los detalles marcan la diferencia en esta fase y Serrien (2016) muestra cómo los jugadores masculinos y femeninos utilizan diferentes mecanismos para generar una velocidad de alto impacto y cómo los deportistas de élite júnior pasan por caminos de desarrollo específicos de la edad y del género. Así, la técnica de la CBR y sus ejercicios de entrenamiento se deberán adaptar al grupo de entrenamiento específico.

F) **La CBR sin balón.** En la CBR sin balón, el brazo de golpeo simplemente realiza un movimiento en el aire de recuperación del brazo, reequilibrando el cuerpo para facilitar el aterrizaje.

### 3.2.5. Fase de aterrizaje

A) **Objetivos.** El objetivo principal en esta fase es reducir el stress que puede producir el impacto contra el suelo sobre las articulaciones de tobillos, rodillas, cadera y columna vertebral (Hernández, 1992; Tillman et al., 2004; Ureña, 1998).

B) **Inicio y fin.** Comienza cuando los pies contactan con el suelo y finaliza cuando el jugador se ha equilibrado tras el impacto (Figura 11).

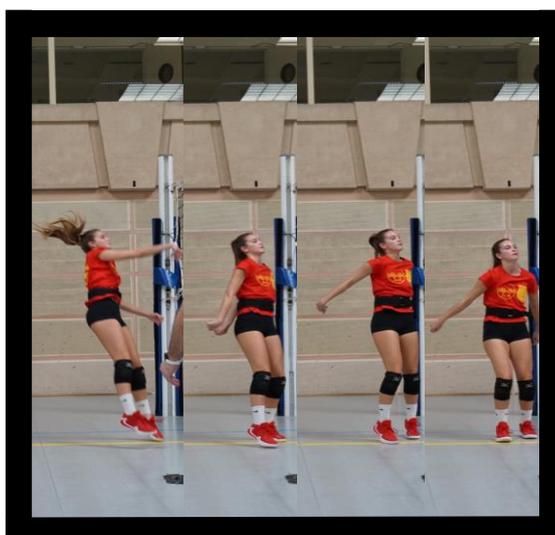


Figura 11. Fotoseriación de la fase de caída del remate.

C) **Ejecución técnica.** El primer contacto con el suelo se realiza con las *puntas* de ambos pies. A ese primer contacto le sigue una cadena cinemática de amortiguación, tobillo-rodilla-cadera, con un ángulo similar al del salto.

Es preferible que la caída se realice con el apoyo simultáneo de los dos pies, a fin de repartir la fuerza de impacto sobre ambas piernas y reducir así el riesgo de lesiones. Caer reiteradamente con un pie aumenta el *stress* sobre las articulaciones, pudiendo ser la causa que origine lesiones por sobrecarga. En la realidad competitiva femenina, Tillman et al. (2004) contabilizaron que el 55% de los apoyos tras el salto de remate se realizaban con los dos pies. Lobietti (2010), en un estudio con deportistas de alto nivel, contabiliza en cambio un 60% en hombres y un 74,7% en mujeres. En este estudio se detalla cómo afectaron el tipo de colocación y la posición en el campo, observando cómo en la parte izquierda del campo (zona IV), tanto para hombres como mujeres, se dan los valores más bajos de aterrizaje con dos piernas (29,9% y 68,7%, respectivamente), siendo los hombres los que más veces caen con un solo pie. Estos valores contrastan mucho con los obtenidos respecto a la parte derecha del campo (zona II), donde los hombres y las mujeres aterrizan con dos piernas en muchas más ocasiones (83,6% y 83,1%, respectivamente) (Lobietti, 2010).

La descripción de la técnica de aterrizaje con una pierna es idéntica a la de aterrizaje con dos, salvo por una diferencia temporal entre el inicio de la amortiguación de la primera y de la segunda pierna. McNitt-Gray (2000) clasifica los aterrizajes en dos tipos: *Land and Stop* (aterrizaje y parada) y *Land and Go* (aterrizaje y continuación). En el *Land and stop* el deportista trata de aterrizar de forma controlada y, en ocasiones, abrupta para evitar tocar la red u otro jugador y se realiza con ambas piernas a la vez. Por el contrario, en el *Land and Go* el deportista trata de aterrizar de forma dinámica para facilitar la transición de la CBR a la siguiente acción, ya sea de defensa, cobertura... Esta técnica suele realizarse primero con una pierna para continuar el movimiento con la otra hacia la siguiente acción técnica. En los ataques combinativos de segunda línea, que permiten el desplazamiento hacia delante durante el aterrizaje y que normalmente requieren recuperar la posición defensiva, como es el caso de los que se realizan por zona VI, se contabilizan los porcentajes más altos de aterrizaje a una pierna, representando estos un 78,6% del total en hombres y un 61,8% en mujeres.

Diversos autores defienden que se deberían enseñar y perfeccionar ambas técnicas durante el proceso de aprendizaje para optimizar su rendimiento posterior y reducir el riesgo de lesión (Marquez et al., 2009; Salci et al., 2004; Sinsurin et al., 2017; Tsai & Chia, 2018).

D) **Aspectos cinemáticos.** El lugar de la caída debe situarse ligeramente por delante del lugar de batida. Si estos dos puntos están muy alejados el uno del otro, el salto habrá perdido altura a favor de un desplazamiento horizontal (Gutiérrez et al., 1992).

Debemos tener en cuenta que existen diferencias, entre hombres y mujeres, en cuanto a ciertos ángulos de flexión de rodilla y cadera, y en cuanto a la fuerza ejercida por los cuádriceps y los isquiotibiales. Estas disimilitudes pueden explicar las diferencias entre las estrategias de aterrizaje utilizadas por cada género (Salci et al., 2004). Concretamente, la forma de aterrizar en las mujeres puede ser la causa que explique el elevado índice lesional en LCA (ligamento cruzado anterior) de la rodilla (Eerkes, 2012; Salci et al., 2004).

E) **Aspectos clave.** Al finalizar la caída, el jugador debe quedar equilibrado y en una posición que le permita continuar con otra acción de juego.

En un primer momento, los estudios nos mostraron cómo, a mayor altura del salto, mayores fuerzas de impacto se generan en el momento del aterrizaje (Zhang, 2000). Posteriormente, Bressel (2005) y Elvin (2007) describieron cómo el tipo de aterrizaje utilizado es fundamental para amortiguar las fuerzas de impacto producidas. Un aterrizaje suave es aquel en el que el deportista empieza la flexión de las rodillas antes del contacto con el suelo, preparándose de antemano para el impacto. De esta forma, las fuerzas de impacto se reparten por las diferentes estructuras corporales, evitando sobrecargas importantes. Diversos autores han encontrado un efecto positivo de los aterrizajes suaves, sobre todo en las mujeres, por el simple hecho de disipar mejor las fuerzas de impacto (Blackburn & Padua, 2009; Briner & Kacmar, 1997; Reeser et al., 2006; Salci et al., 2004), reduciendo así el riesgo lesional (Kabacinski et al., 2017). En cambio, un aterrizaje duro se da cuando este se realiza con poca flexión de las rodillas y, por consiguiente, con una elevada rigidez estructural que dificulta la amortiguación. Las fuerzas generadas durante el impacto se transmiten directamente sobre la estructura ósea y articular a nivel de tobillo, tibia, rodilla y lumbares. La menor participación de la musculatura del cuerpo para sujetar y amortiguar los impactos aumenta los valores de las fuerzas de impacto en el aterrizaje (Elvin et al., 2007).

F) **La CBR sin balón.** En la realización de la CBR sin balón no es necesario reequilibrar y compensar la acción del golpeo ( $\alpha_4$ ), lo que facilita la fase de amortiguación a pesar de que, normalmente, la altura del salto sea mayor.

### **3.3. La carrera batida de remate como patrón de movimiento**

Un PM es una serie de acciones o movimientos organizados en una secuencia algorítmica, cuya combinación permite el ejercicio de la función motriz que requiere estabilidad y permanencia en el repertorio motor del ser humano. Cualquier movimiento se puede describir como un patrón y este puede ser de tipo normal o anormal. Un PM óptimo o normal tendrá un inicio del movimiento claro y un seguimiento sin ningún movimiento adicional, mientras que el patrón anormal o disfuncional sumará más movimientos que dificultarán la fluidez y el rendimiento óptimo de la serie. Cualquier patrón se desarrolla mediante la práctica habitual y se almacena en el sistema nervioso central. La práctica que sea fruto de una activación muscular deficiente generará un patrón disfuncional en el sistema nervioso central, por lo que, para modificarlo, se deberá hacer de forma consciente (Gamboa, 2010).

Todo movimiento humano complejo viene derivado de los patrones fundamentales de movimiento que constituyen la base para poder aprender habilidades más complejas como son las técnicas deportivas (Gamboa, 2010).

Estos patrones fundamentales de movimiento se dividen en tres grandes grupos: locomotores (secuencia de movimientos con un tiempo y espacio determinado que requieren desplazarse de un lugar a otro), manipulativos (combinación de movimientos con un espacio y tiempo determinados que involucra al individuo con un objeto) y de equilibrio o estabilidad (habilidad para mantener el equilibrio en relación a la fuerza de gravedad) (Cerdas et al., 2002).

El PM de la CBR está compuesto por los tres tipos de patrones fundamentales de movimiento. Se observa el patrón locomotor en toda la secuencia de movimientos realizados en la CBR, el manipulativo en el momento de golpear el balón en el aire, y el de equilibrio durante toda la CBR. Los patrones fundamentales de movimiento son determinantes para poder aprender correctamente el PM de una habilidad compleja (Gamboa, 2010) como es la CBR.

Desde el punto de vista de la evolución cualitativa y del aprendizaje motor de un PM, se dividen en tres etapas:

- **Estadio inicial:** es la primera tentativa de ejecución de un patrón, con una integración mínima de segmentos corporales para realizar la acción. Se caracteriza por la ausencia

de control, precisión, fluidez, amplitud y armonía en los movimientos: “en el estadio inicial se realizan los primeros intentos observables para llevar a cabo un tipo de movimiento, no mostrando parecido con la imagen, que cada cual posee, de un movimiento realizado con eficiencia y habilidad” (Ruiz Pérez, 1994).

- **Estadio elemental:** esta etapa de desarrollo es similar a la del patrón maduro, con una integración mayor de segmentos corporales requeridos para la acción. Se manifiesta aún cierta falta de concreción en aspectos como el control motor, la precisión, la fluidez, la amplitud, la armonía y la organización en las acciones corporales para ejecutar el movimiento. Es un periodo de transición en que hay mayor coordinación, mayor control motor y mayor parecido con el movimiento maduro (Ruiz Pérez, 1994).
- **Estadio maduro:** en esta fase ya se han integrado la totalidad de los segmentos corporales necesarios para la ejecución eficiente del patrón. Se caracteriza por el control, precisión fluidez, amplitud, armonía y organización en las acciones corporales involucradas en el movimiento. Se evidencia una clara organización en la ejecución del patrón: “con el término ‘maduro’ se destaca que las características morfológicas de la acción y su posible empleo en la solución de problemas son similares a las que manifiestan los adultos bien desarrollados y conocedores de dichas acciones” (Ruiz Pérez et al., 2001).

En la tarea de aprender un PM para desarrollar una habilidad compleja, el objetivo es alcanzar la etapa de patrón maduro. Es en la etapa madura cuando se consolidan los elementos habituales que se pueden observar en la ejecución de un PM por parte de una persona motrizmente desarrollada o experta, y cuando sus movimientos son integrados (Ruiz Pérez, 1994; Wickstrom, 1983). Por ello, podemos afirmar que se logra la madurez de un PM, conforme al modelo formal de referencia, con su adquisición y ejecución correcta, siendo este proceso independiente de la edad y no mostrando un carácter cronológico (McClenaghan & Gallahue, 1978; Wickstrom, 1983).

En este desarrollo evolutivo de los patrones de movimiento a lo largo de las tres etapas, los elementos como la fluidez y la precisión en los movimientos, así como la fuerza empleada para la realización de este, van mejorando. En el patrón maduro se observan movimientos controlados, ajustados, coordinados y que presentan una elevada fluidez, amplitud, fuerza, precisión, velocidad e integración de un número mayor de segmentos corporales (Gómez, 2000; McClenaghan & Gallahue, 1978).

Los patrones de movimiento son susceptibles de perfeccionarse solo a través de la práctica. La experiencia adquirida es fundamental para el desarrollo de los patrones, pero también otros factores influyen en este proceso, como la maduración (Granda Vera & Barbero Álvarez, 1995; Ruiz Pérez, 1994; Ruiz Pérez et al., 2001) de los diferentes sistemas que intervienen en la ejecución de un movimiento, como el sistema nervioso central y los sistemas sensoriales como la visión. Es decir, en la evolución de estos patrones inciden tanto factores individuales como del entorno (Gallahue & Ozmun, 1995; David Gallahue, 2006; McClenaghan & Gallahue, 1978). La práctica, a través de la exploración, el descubrimiento o la imitación, es un elemento de primer orden.

### **3.4. La percepción visual y su influencia en la interceptación del balón**

En los estudios realizados en esta tesis, a pesar de no analizar la capacidad de percepción visual de las jugadoras, la percepción de la trayectoria del balón en la CBR con balón jugará un papel determinante en la estructura de su PM y, en consecuencia, en la VM. Por esta razón, en este apartado vamos a describir cómo la percepción visual influye en el rendimiento de la interceptación de un balón, como ocurre en un PM de una habilidad compleja tal como la CBR con balón. La influencia de la percepción visual para interceptar el balón en su trayectoria podrá ser un factor que influya en la VM de la CBR, tanto entre noveles y expertos como en relación con la zona del campo desde la que se lleve a cabo el golpeo.

Cuando una jugadora realiza un PM de una habilidad compleja como la CBR con balón, en la que debe coordinar los movimientos del cuerpo con la trayectoria de un móvil, toma mucha relevancia la capacidad de percepción visual del sujeto para lograr una correcta interceptación. En la CBR en particular, para aumentar las posibilidades de éxito en la acción de remate, deberemos conseguir coordinar el momento de salida de la carrera de aproximación y ajustar la velocidad de ésta para determinar el lugar exacto de la realización del salto y lograr la máxima altura posible en una posición respecto al balón que nos permita golpearlo en el punto más alto del salto, sin necesidad de adoptar posturas no deseadas. A continuación, describimos cómo se desarrolla el proceso de la percepción visual y las diferentes características de la persona que influyen a la hora de poder recoger la mejor

información en el menor tiempo posible para tomar la decisión adecuada y disponer del tiempo suficiente para actuar.

### 3.4.1. El mecanismo de procesamiento de la información y la toma de decisión

El mecanismo de procesamiento de las habilidades perceptivo-motrices fue definido por Whiting en 1969 para integrar las teorías existentes. Todas las habilidades perceptivo-motrices que requieren la interacción con un balón tienen tres componentes físicos unidos entre sí: los órganos sensoriales, una serie de mecanismos centrales del cerebro y el sistema muscular (Sillero, 2002). A su vez, los mecanismos centrales se dividen en tres tipos: perceptivos, traslatorios y efectores.

En cuanto al ámbito funcional, distinguimos tres componentes: el *input* o entrada de información a través de los órganos sensoriales, los procesos de toma de decisión que se realizan en los mecanismos centrales y el *output* o salida de los datos del sistema nervioso central para que el sistema muscular realice la acción. Estos tres modelos se pueden integrar en uno mucho más completo sobre el análisis de la información que permite la ejecución perceptivo-motriz (Sillero, 2002; Whiting, 1969) (Figura 12):



Figura 12. Análisis de la información para la ejecución perceptivo-motriz (Sillero, 2002).

El modelo resultante es considerado dinámico por Whiting (1969), ya que el sistema nervioso, el medio ambiente y la atención del ser humano se encuentran en continuo estado de cambio, elaboración y sofisticación. Debemos tener en cuenta que el sujeto no es capaz de utilizar toda la información de la que dispone procedente del medio ambiente en un solo instante. La atención selectiva determina tanto la información que es extraída como la amplitud del campo perceptivo. Son los mecanismos perceptivos centrales los que interpretan los datos sensoriales procedentes del medioambiente externo e interno. Son estas percepciones las que ayudan a tomar decisiones relativas a nuevas acciones. La respuesta se lleva a cabo mediante el mecanismo traslatorio, seleccionando el patrón de respuesta y el sistema efector adecuado, y proporcionando el comando de ejecución apropiado al sistema muscular para que este realice la respuesta motora. Así se produce una modificación del medioambiente (interno y/o externo), originando una información, a modo de *feedback*, sobre la efectividad de la respuesta. Este *feedback*, unido a la información recibida del medioambiente, es utilizado para el control de la respuesta o la iniciación de nuevas acciones.

### **3.4.1.1. Fuentes de información necesarias para anticipar la trayectoria de un objeto en movimiento**

Para lograr la anticipación de la trayectoria de un móvil por parte de un/una deportista es necesario conocer cuatro tipos de información (Stone et al., 2014; Whiting, 1969): 1) información sobre la posición del objeto en el espacio; 2) información sobre la dirección del desplazamiento del objeto; 3) información sobre la velocidad de desplazamiento del objeto; 4) información sobre la aceleración o desaceleración que sufre el objeto en el recorrido de su trayectoria. El ojo humano funciona como un mecanismo de detección que proporciona constantemente informaciones de retroalimentación (*feedback*) sobre los cuatro tipos de información con el objetivo de ajustar continuamente el movimiento del cuerpo, adecuando poco a poco su predicción. En este proceso, la experiencia que pueda tener el deportista en ese entorno va a jugar un papel relevante. Varios estudios demostraron que la captación de información no siempre va a tener carácter continuo, sino que el ser humano es capaz de integrar información discontinua para predecir el punto de interceptación de un objeto en movimiento (Panchuk et al., 2013; Sharp & Whiting, 1974; Stone et al., 2014; Whiting, 1970; Whiting et al., 1988).

Si tomamos como ejemplo de percepción de trayectorias el seguimiento de un balón para realizar una recepción, necesitaremos básicamente dos tipos de información (Savelsbergh & Bootsma, 1994):

- Información temporal: el sujeto debe poder calcular cuándo llegará el balón para la interceptación. Un error de percepción de 30 ms en la estimación de la trayectoria del balón impide interceptarlo, como comprobaron Savelsbergh y Bootsma (1994) en jugadores de alto nivel de tenis de mesa.
- Información espacial: el sujeto necesita la información sobre el desplazamiento del centro de expansión del objeto en relación con su posición en el espacio (excentricidad del movimiento) para saber dónde colocar la mano para interceptar el balón.

La información sobre el movimiento se utiliza con tres fines distintos (Jessell et al., 1997): 1) la percepción de objetos móviles; 2) el mantenimiento de los movimientos de persecución de los ojos; 3) guiar el movimiento del cuerpo en el medio.

### **3.4.1.2. Información visual utilizada para la percepción de las trayectorias**

La percepción de las trayectorias es una tarea visual muy compleja, que implica a la mayor parte de las habilidades visuales del individuo (García et al., 1994). Para estimar el punto donde va a caer un balón de voleibol, el sujeto debe integrar la información procedente de sus movimientos oculares (seguimientos, sacádicos, reflejos óculo-vestibulares y vergencias) y otras sensaciones propioceptivas, con habilidades visuales como la percepción de la profundidad (estereopsis), la percepción del contraste, la agudeza visual estática y dinámica (capacidad de discriminar detalles), la eficacia visual (habilidad de rendir adecuadamente sin que aparezca fatiga visual), la acomodación (capacidad de cambiar de enfoque de forma rápida y precisa, para ver con nitidez a diferentes distancias) y la amplitud del campo visual (parcela de la realidad que capta el ojo cada vez que hace una panorámica del entorno) (Loran & MacEwen, 1997).

#### **La agudeza visual**

Para percibir correctamente el objeto es necesaria una agudeza visual suficiente. No obstante, una agudeza visual perfecta no está directamente relacionada con la eficacia visual, ya que encontramos muy buenos deportistas que tienen una agudeza visual por debajo de lo normal (Voisin et al., 1997); ante estas carencias, el sistema visual genera adaptaciones que le permiten obtener la información necesaria por otros medios.

De esta forma, podemos distinguir hasta cuatro subcategorías de agudeza visual ( Whiting, 1969)

- Agudeza visual de detección: que permite determinar si un objeto está presente en el campo visual.
- Agudeza visual de reconocimiento: que permite conocer de qué objeto se trata.
- Agudeza visual de resolución: que permite discriminar partes o contornos del objeto.
- Agudeza visual de localización: que permite juzgar la posición de un objeto en el espacio.

En referencia a la interceptación de un balón durante el remate en voleibol son muy relevantes los tipos de agudeza visual determinados por la situación dinámica del objeto, es decir, la agudeza visual estática y la agudeza visual dinámica.

### **Agudeza visual estática**

Se define como la capacidad de reconocer o detectar las imágenes en detalle cuando, tanto el objeto como el observador, están en reposo (García et al., 1994). Se considera que el momento de máxima agudeza visual tiene lugar cuando el objeto está enfocado en la fóvea. La agudeza visual estática depende de factores ambientales y factores individuales.

Factores ambientales como:

- La iluminación: la agudeza visual empeora en condiciones extremas de iluminación.
- La adaptación: disminuye cuando las condiciones de luz cambian y la retina se debe adaptar a esas condiciones.
- El contraste: a mayor contraste entre el objeto y el fondo, mayor agudeza visual.
- La duración: la observación debe durar el tiempo justo; un exceso o un defecto de tiempo de observación perjudican la agudeza visual.

Factores individuales:

- La edad: la agudeza visual se pierde progresivamente a partir de los 40-50 años.
- La distribución de fotorreceptores: dependiendo de la zona del ojo con la que se vea la imagen, esta se verá con mayor nitidez.

- El diámetro pupilar: regula la nitidez de la imagen mediante la cantidad de luz.
- Los defectos de refracción: las ametropías (hipermetropía y miopía) disminuyen la agudeza visual.

### **Agudeza visual dinámica**

Es muy importante para las situaciones creadas en el deporte, ya que permite la detección y el reconocimiento de objetos en movimiento, discriminando dos factores: el descentramiento y la velocidad.

La agudeza visual dinámica varía en función de la velocidad del desplazamiento y la cantidad de luz. La mayor efectividad se obtiene cuando se dispone de algún sistema de referencia fijo dentro del campo visual. Si faltan dichos puntos de referencia, el movimiento se percibe con mayor dificultad y la evaluación del movimiento se retrasa (Sillero, 2002).

#### **3.4.1.3. Información propioceptiva para la percepción de las trayectorias**

Para que el deportista pueda interceptar el balón, además de la información visual también recibe información propioceptiva sobre la posición del propio cuerpo y sobre los movimientos oculares producidos durante el seguimiento del balón. Todas estas informaciones propioceptivas se deben integrar con las exteroceptivas, principalmente visuales, para realizar una respuesta adecuada. En este sentido, son muy importantes el sistema vestibular, los movimientos sacádicos oculares, la formación reticular, los propioceptores articulares y el papel integrador del cerebelo (Houssay, 1989).

#### **3.4.2. Tiempo motor y respuesta de reacción**

Tanto el tiempo motor como la respuesta de reacción tienen relación con el tiempo de reacción. El tiempo motor es el que transcurre entre que se empieza a hacer la acción y se termina. Si al aparato de medición del tiempo de reacción simple se le añade otro cronómetro, el tiempo que transcurre entre soltar un botón y apretar el otro sería el tiempo motor empleado para realizar la acción requerida (Sillero, 2002).

Factores como la activación muscular, la fatiga, el nivel de práctica, la experiencia en realizar el movimiento, el segmento con que se realice el movimiento, el tipo de tarea y la tensión previa (Botwinick & Thompson, 1966) afectarán al tiempo motor.

### 3.4.3. Interceptación o anticipación coincidente

La diferencia fundamental entre la anticipación coincidente y otros conceptos (tiempo de reacción, tiempo de reacción electiva y anticipación) es que el estímulo no es fijo y no se manifiesta súbitamente, sino que perdura y es móvil y/o variable en el tiempo, obligándonos a adaptar nuestra respuesta al movimiento que percibimos. Un ejemplo de interceptación sería rematar un balón o pararlo con la planta del pie cuando se dirige hacia nosotros.

Por otro lado, es importante diferenciar entre una tarea de interceptación y una de rastreo:

- En las tareas de rastreo, lo importante es la ejecución de la tarea de forma continuada, no el seguimiento visual del objeto. No son importantes los períodos de latencia ni la anticipación. Un ejemplo de ello sería el seguimiento con un puntero de un punto situado en una superficie rotatoria.
- En las tareas de interceptación, la respuesta solicitada es discreta, no continua. Un ejemplo sería señalar con el puntero solo el punto en el que el objeto pasa por la parte superior de la trayectoria (Andreas, 1978). En estos casos se pueden estudiar los períodos de latencia en la respuesta.

Los estudios sobre interceptación han explorado las siguientes posibilidades: la búsqueda de diferencias individuales en la agudeza visual dinámica y su influencia en la anticipación (Sanderson et al., 1981); la influencia de la experiencia previa en situaciones de interceptación (Wade, 1980); las fases del movimiento del objeto más importantes para realizar la correcta interceptación, llegándose a la conclusión de que la fase del movimiento más importante es la puesta en movimiento del objeto (Nettleton, 1979).

Cuando observamos la actividad deportiva o, simplemente, las acciones que hacemos en nuestra vida diaria, vemos que se suceden muchas situaciones en las que una persona debe ajustar sus acciones a las de un móvil, anticipándose a la acción. La percepción de trayectorias es una situación habitual en la vida cotidiana y, a pesar de ello, la mayoría de los estudios analizan solamente trayectorias uniformes (Savelsbergh & Bootsma, 1994; Whiting, 1969; Whiting & Sharp, 1974) y no estudian las dificultades que se presentan en la mayoría de las acciones deportivas, en las que la trayectoria del objeto en movimiento es cambiante, igual que el resto de las condiciones.

### **3.4.4. Factores que influyen en la percepción de las trayectorias**

Son varios y diferentes los factores que influyen en la percepción de las trayectorias. Uno de ellos es la trayectoria de curva irregular del balón, en lugar de parabólica. Existe la idea de que un balón en el aire, como ocurre durante una colocación, describe una parábola, pero no es así, debido a la resistencia del aire. De esta forma, en una colocación de tercer tiempo, como la que se realiza en los estudios de esta tesis, el balón describe una curva irregular, más abierta en la fase ascendente que en la descendente, resultando un tiempo de elevación menor que el de descenso (Dowell et al., 1985). Otros factores influyentes son el efecto Magnus y el liftado del balón, que se refieren al giro del balón durante su trayectoria en el aire. Se dará el efecto Magnus cuando la velocidad de giro provoque que haya más presión en la parte inferior del balón, haciendo que aumente el alcance del tiro, lanzamiento o colocación (posibilidad baja por las características habituales de no rotación de la colocación). Se dará una situación de liftado, o de dejada, o de sensación de bola cortada, cuando la velocidad de giro haga que haya más presión en la parte superior de la bola y que disminuya, así, el alcance del tiro, lanzamiento o colocación. También pueden influir las condiciones ambientales. Temperatura, humedad, viento... serán algunos de los factores que podrán afectar a las trayectorias y a las características del balón. Las especificaciones técnicas del balón, como el peso, el material o la presión, marcarán la cantidad y el tipo de rozamiento de este, pudiendo modificar su trayectoria. Además, también influirá la situación del sujeto durante la acción: la percepción de la trayectoria de un balón se ve dificultada cuando el sujeto está en movimiento o realizando simultáneamente una acción diferente. En un experimento en el que se debían interceptar pelotas que caían por una rampa mientras los sujetos circulaban a su lado montados en una bicicleta, estos fallaron la interceptación en el 84% de los intentos (Lenoir et al., 1999), observando un mayor índice de error cuando se realiza otra tarea mientras se intenta conseguir una interceptación. Si el sujeto tiene que dividir su atención entre dos acciones distintas, disminuirá su eficiencia en la tarea.

#### **3.4.4.1. La percepción de las trayectorias en expertos y noveles**

Los estudios corroboran la idea que cuanto más experimentado es un deportista, mejor capacidad perceptiva tiene, sobre todo si se compara con personas no deportistas o incluso sedentarias (Sillero, 2002). Tienen un mayor control de los mecanismos de obtención de la

información. Los deportistas expertos realizan fijaciones más largas y precisas y con mayor atención a la bola y el hoyo durante la práctica del golf (Vickers, 1992), se adaptan mejor a las trayectorias anómalas de la bola (Ripoll & Latiri, 1997), son capaces de simultanear mejor otra actividad mientras realizan una tarea motriz, disminuyendo menos su rendimiento (D. J. Smith et al., 1992), actúan de manera más precisa (Oudejans et al., 1997; Williams & Davids, 1998), aunque las capacidades perceptivas sean semejantes (McLeod, 1987; Petrakis, 1981), y ejecutan antes la acción, gracias el uso de claves que permiten anticipar la trayectoria de la pelota, como sería el caso del movimiento del brazo en el squash (Abernethy, 1990).

### **3.5. Evolución de la carrera batida de remate desde la iniciación hasta el alto rendimiento**

La CBR es considerada una de las técnicas más complejas y difíciles de dominar del voleibol por lo que, a pesar de que se empieza a enseñar muy pronto, no se conseguirá un nivel alto de eficacia o eficiencia hasta alcanzar la madurez deportiva.

En el voleibol la competición está dividida por categorías en función de la edad del deportista para procurar, dentro de lo posible, cierta igualdad en las condiciones antropométricas y madurativas de los participantes. De esta forma, la Real Federación Española de Voleibol establece las siguientes categorías:

Alevines: Deportistas de 11 y 12 años. P. ej., para la temporada 2020-2021, los nacidos en el 2009 o 2010.

Infantiles: Deportistas de 13 y 14 años. P. ej., para la temporada 2020-2021, los nacidos en el 2007 o 2008.

Cadetes: Deportistas de 15 y 16 años. P. ej., para la temporada 2020-2021, los nacidos en el 2005 o 2006.

Juveniles: Deportistas de 17, 18 y 19 años. P. ej., para la temporada 2020-2021, los nacidos en el 2002, 2003 o 2004.

Sénior: Deportistas a partir de 20 años. P. ej., para la temporada 2020-2021, los nacidos a partir del 2001.

Cada categoría tiene unas características físicas, emocionales, mentales, psicológicas y madurativas distintas que justifican diferentes alturas de la red. A pesar de ello, el modelo técnico de la CBR enseñado es substancialmente el mismo para todas las categorías y sin diferenciar por género.

En la literatura científica no se encuentran estudios donde se analicen las diferencias en la técnica de la CBR según la categoría, a pesar de que Serrien, en 2016, ya apunta la necesidad de adaptar los programas de aprendizaje a la edad y género para favorecer una adecuada evolución de la fuerza y la coordinación. Cuando se analizan unos pocos parámetros mecánicos de salto durante la CBR, es complicado encontrar diferencias entre las distintas categorías, obteniendo resultados similares entre ellas (Jandova & Janura, 2019). Es cuando se analiza la CBR desde una perspectiva más holística, valorándose parámetros de diferentes áreas, como pueden ser la capacidad de aprendizaje, la capacidad de memoria de trabajo y la efectividad en la tarea, cuando se encuentran diferencias por categoría (Bisagno & Morra, 2013, 2015, 2018). Conseguir esta información puede ser importante para la construcción de programas de formación específicos por edad y género con especificaciones diferenciadas a nivel de coordinación y fuerza (Serrien et al., 2016a).

### **3.6. La carrera batida de remate en noveles vs. expertos**

A pesar de las diferencias madurativas a nivel físico y cognitivo inherentes a la edad, un PM se considera maduro cuando se consigue reproducir el modelo formal de referencia y esto es algo independiente de la edad, se puede alcanzar en la etapa de la infancia o en otro momento de la vida, o quizás nunca sea logrado (McClenaghan & Gallahue, 1978; Wickstrom, 1983). Es por este hecho que la división entre deportistas noveles y expertos va vinculada a los años de experiencia en la actividad y a su nivel de rendimiento. Dejando de lado las diferencias por categorías que van vinculadas a la edad, la contraposición entre noveles y expertos nos permite observar las diferencias entre los que empiezan a aprender un PM y los/las deportistas que ya están en la etapa de perfeccionamiento y pulidez de este.

En las tablas 1, 2 y 3 se presentan, de forma resumida, los principales estudios que analizan la CBR tanto en noveles como en expertos, y también aquellos que comparan noveles con expertos.

El parámetro *interacción con el balón* medirá cómo condiciona el balón a la CBR del sujeto (SB = sin balón; BCg = balón colgado; BL = balón lanzado; BC = balón colocado; JR = situación de juego real; ND = no descrito).

Tabla 1. Resumen de los estudios realizados en expertos.

Artículo	Sujetos del estudio	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Bowman, 2001	Mujeres NCAA división III 20,3 ± 2,31	ND	Z: ND D: un objetivo en el suelo	Las diferencias de velocidad después del golpeo en la CBR entre el armado de arquero y el armado circular
Ciapponi et al., 1996	Intercolegiales mujeres	SB	-	Explorar el equilibrio y la habilidad para mejorar la fase de aproximación de la CBR
Liu et al., 2001	Hombres 17-19	ND	Z: z IV D: ND	Efecto de diferentes longitudes en el paso de orientación
Chen & Huang, 2008	Mujeres 17,2	BC	Z: z IV, z I D: entre los 3 y 9 metros	Desplazamiento del centro de gravedad en la CBR en ataques de primera y segunda línea
Marquez et al., 2009	Hombres 19,6 ± 0,7	BC	Z: z IV D: ND	Efectos de la distancia del salto en el posterior aterrizaje de la CBR
Pion et al., 2015	Mujeres élite y sub-élite de Bélgica 15,3 ± 1,5	-	-	Estudio longitudinal de las diferencias antropométricas, de rendimiento físico y de coordinación motora general

Artículo	Sujetos del estudio	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Paz et al., 2017	Mujeres 13,6 ± 1,2 3,9 ± 1,2 años de experiencia	-	-	Mejorar la identificación de los parámetros de rendimiento en jóvenes jugadoras
Milić et al., 2017	Mujeres 14 ± 0,9	-	-	Determinar las diferencias antropométricas y de rendimiento físico, a fin de identificar el talento para la posición del juego
Serrien et al., 2018	Hombres y mujeres entre 14-18	BC	Z: z IV D: a un objetivo de 3x3m en z VI	Variabilidad de coordinación y secuenciación proximal a distal en la CBR de voleibol de jugadores/as juveniles de élite: efectos del género y el crecimiento

SB= sin balón; BCg = balón colgado; BL = balón lanzado; BC = balón colocado; JR = situación de juego real; ND = no descrito

Tabla 2. Resumen de estudios que combinan noveles y expertos.

Artículo	Edad media deportistas	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Coutts, 1982	Mixto	SB	-	Medir las variables de las fuerzas de reacción verticales producto de la CBR
Smith, 1992	Dos grupos de hombres: 24,8 ± 2,2 equipo nacional; 21,1 ± 1,8 equipo nacional en la Universiada	SB	-	Diferencias en los rendimientos físicos y fisiológicos de los jugadores
Coleman et al., 1993	Alto nivel (hombres)	JR	Z: z IV D: ND	Examinar la relación entre los movimientos de las extremidades inferiores, las superiores y el cuerpo entero con la velocidad del balón después del golpeo
Ferris et al., 1995	Mujeres NCAA I :19,5 ± 1,1	BC	Z: z IV D: en la dirección del radar	Relación de las variables físicas y fisiológicas con la velocidad del remate
Guo & Li, 1998	Nivel de selecciones nacionales (hombres)	JR	Z: ND D: ND	Análisis cinemático de la CBR durante la competición

Artículo	Edad media deportistas	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Tillman et al., 2004	Universitarias (mujeres)	JR	Z: ND D: ND	Número de saltos por CBR en partidos y evaluación de las medidas que se pueden tomar en la prevención de lesiones. Tipos de patrones motores en los aterrizajes
Salci, 2004	Hombres 22,3 ± 2,5. Mujeres 20,5 ± 1,9	SB	-	Diferentes formas de aterrizaje en la CBR
Forthomme et al., 2005	Hombres élite en Bélgica, dos grupos: N1 = 26 ± 5,4 N2 = 21 ± 3,04	BC	Z: z IV D: Diagonal	Ver las relaciones entre la fuerza isocinética del hombro y el codo con el rendimiento en la CBR
Kuhlmann et al., 2007	Selecciones nacionales masculinas	JR	Z: ND D: ND	Análisis del despegue y aspectos coordinativos durante el salto en la CBR
Marquez et al., 2007	Hombres de nivel <i>top</i> mundial 25,7 ± 3,5	JR	Z: ND D: ND	Cómo aterriza un jugador de nivel <i>top</i> mundial después de rematar
Lobiatti, 2010	Primera Liga Escocesa (mujer de 25 con 10 años de experiencia)	SB	-	Comparación biomecánica entre la CBR y el salto de bloqueo

Artículo	Edad media deportistas	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Masumura et al., 2009	Mujeres de nivel Grand Prix	JR	Z: z IV y z VI D: ND	Diferencias entre la CBR por zona IV y por zona VI, para encontrar posibles mejoras técnicas de la CBR por zona VI
Sheppard et al., 2009	Hombres de nivel internacional $20,9 \pm 2,6$	SB	-	Consideraciones sobre las demandas fisiológicas en la competición según la posición en el campo
Kuhlman et al., 2011	Hombres de selecciones nacionales	JR	Z: z IV D: ND	Análisis de la velocidad del centro de gravedad durante la fase de aproximación de la CBR y su correlación con la altura del salto
Tabor et al., 2018	Hombres del centro de élite polaco $18,3 \pm 0,95$ $6,7 \pm 1,14$ de experiencia	BC	Z: z IV y z I D: Línea y diagonal	Velocidad del golpeo del balón en ataque dependiendo de la zona del campo
Shahbazi et al., 2007	Equipo nacional masculino $19,4 \pm 4,94$	SB	-	Analizar el equilibrio y la habilidad en la fase de aproximación y en la fase de batida para conseguir una CBR con un salto potente y eficaz

Artículo	Edad media deportistas	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Shahbazi et al., 2008	Equipo nacional masculino 19,4 ± 4,94	SB	-	Descubrir las correlaciones exactas entre la velocidad de los pasos de la CBR y la altura conseguida
Sheppard et al., 2008	Hombres becados en el programa del equipo nacional de Australia 20,8 ± 3,9	SB	-	Importancia relativa de la fuerza, la potencia y las medidas antropométricas para el rendimiento del salto en jugadores de voleibol de élite
Bisseling et al., 2008	Dos grupos de jugadores holandeses: sin antecedentes de lesiones 23,6 ± 2,5; con antecedentes de lesiones 22,4 ± 2,6	SB	-	Comparar los movimientos del tobillo y la rodilla en la CBR entre jugadores sin lesiones previas y jugadores con antecedentes de tendinopatía rotuliana
Wagner et al., 2009	Hombres de la liga austriaca 24,1 ± 4,1 10,3 ± 4,1 experiencia	BCg	Z: z III D: ND	Análisis cinemático de la CBR
Lobietti et al., 2010	Hombres y mujeres profesionales de la liga italiana	JR	Z: todas	Análisis de las diferentes técnicas de aterrizaje de la CBR
Hsieh et al., 2010	Mujeres élite de la NCAA 1	SB	-	Diferencias en la altura del salto en la CBR con 4 pasos de aproximación

Artículo	Edad media deportistas	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Chen et al., 2011	Mujeres $20 \pm 1,3$ y hombres $20,9 \pm 1,5$ de la universidad de Taiwan	BC	Z: z IV D: diagonal sobre un objetivo en la esquina de z V	Investigar las diferencias entre géneros en los parámetros cinemáticos de la CBR
Wagner et al., 2012	Hombres de la liga austríaca $24 \pm 4$ $9 \pm 4$ años de experiencia	BCg	Z: z III D: En línea en un corredor de 3x3M	Analizar los movimientos de brazos en la fase de preparación para el golpeo en la CBR
Bermejo et al., 2013	Mujeres de la Superliga Femenina española $23,7 \pm 5,7$ y $11,5 \pm 7,09$ años de experiencia	BC	Z: ND D: ND	Establecer valores cinemáticos de referencia en el voleibol nacional

Artículo	Edad media deportistas	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Valadés Cerrato et al., 2016	Mujeres de la Superliga Española 23,82 ± 5,42 y 11 ± 6,93 años de experiencia	BL	Z: z IV D: Hacia el radar	Correlación entre la fuerza y la velocidad del remate en un equipo profesional durante una temporada
Serrien et al., 2016a	Cuatro grupos de élite belgas: Edad: élite hombres 23,33 ± 2,78; élite mujeres 24,23 ± 2,01; élite joven hombres 15,05 ± 0,76; élite joven mujeres 15,19 ± 0,54 Años de experiencia: élite hombres 14,67 ± 2,40; élite mujeres 13,89 ± 1,98; élite joven hombres 6,33 ± 1,98; élite joven mujeres 5,67 ± 1,67	BC	Z: z IV D: Remate centrado	Análisis mediante mapeo paramétrico de las características de la CBR en la cinemática 3D.

Artículo	Edad media deportistas	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Serrien et al., 2016b	Cuatro grupos de élite belgas: Edad: élite hombres $23,33 \pm 2,78$ ; élite mujeres $24,23 \pm 2,01$ ; élite joven hombres $15,05 \pm 0,76$ ; élite joven mujeres $15,19 \pm 0,54$ Años de experiencia: élite hombres $14,67 \pm 2,40$ ; élite mujeres $13,89 \pm 1,98$ ; élite joven hombres $6,33 \pm 1,98$ ; élite joven mujeres $5,67 \pm 1,67$	BC	Z: ND D: remate centrado	Análisis de la variabilidad en la coordinación y el rendimiento en la CBR
Vaverka et al., 2016	Élite hombres de República Checa $27,9 \pm 7,1$	SB	-	Influencia del balanceo de brazo en la altura del salto vertical y el rendimiento de la CBR
Sinsurin, 2017	Jugadoras mujeres: $19,7 \pm 1,4$ y $9,6 \pm 2,0$ años de experiencia	SB	-	Diferencias en las extremidades inferiores en diferentes direcciones de aterrizaje
Kabacinski et al., 2017	Jugadoras mujeres del primer equipo $22,3 \pm 4,2$	SB	Z: Primera línea y segunda línea	Análisis de las fuerzas de reacción en el aterrizaje de la CBR

Artículo	Edad media deportistas	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Zahalka et al., 2017	Hombres de la primera liga de República Checa 28 ± 4,3	BC	Z: z III D: ND	Diferencias cinemáticas entre dos tipos de batida en la CBR
Ikeda, 2017	Jugadoras universitarias japonesas 19,6 ± 1,1 y 10,7 ± 2,1 años de experiencia	SB	-	Factores que influyen en la CBR dependiendo de los valores obtenidos en salto horizontal desde estático y en salto vertical
Giannopoulos et al., 2017	Hombres de las dos primeras ligas de Grecia 27,5 ± 5,5	JR	Z: todas D: ND	Relación entre el somatotipo, el nivel de competición y su rendimiento en remate con la CBR
Fuchs, Fusco et al., 2019	Hombres y mujeres de la primera división austríaca: Mujeres: 19,9 ± 3,5; años de entrenamiento 8,4 ± 3,9. Hombres: 22,7 ± 4,3; años de entrenamiento 10,1 ± 5,9	BCg	Z: ND D: hacia un objetivo	Diferencias biomecánicas de la CBR entre hombres y mujeres
Fuchs, Menzel et al., 2019	Mujeres de la primera división austríaca: Mujeres: 19,9 ± 3,5; años de entrenamiento 8,4 ± 3,9.	BCg	Z: ND D: hacia un objetivo	Características del movimiento para el rendimiento de la CBR en mujeres

Artículo	Edad media deportistas	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Sarvestan et al., 2020	Hombres 15,4 ± 0,72 y 6,51 ± 0,7 de experiencia	BC	Z: z III D: Libre	Diferencias cinemáticas entre CBR exitosas y no exitosas
Kumar et al., 2020a	Jugadores de alto nivel de India 16-20	BC	Z: z IV D: ND	Análisis cinemático y antropométrico de las variables que describen la técnica de la CBR
Kumar et al., 2020b	Jugadores de alto nivel de India 16-20	BC	Z: z IV D: ND	Análisis biomecánico de la fase de batida de la CBR, basándose en variables antropométricas y cinemáticas
Cronin et al., 2005	Jugadoras de la NCAA I: 21,3 ± 2,4 y 7,1 ± 1,6 años de experiencia	BL	Z: z IV D: ND	El aumento de <i>feedback</i> reduce las fuerzas de impacto en el aterrizaje de la CBR
Wedaman et al., 1988	Jugadoras de nivel <i>top</i> universitario	BCg	Z: ND D: ND	Coordinación segmentaria y estructura temporal de la CBR

SB = sin balón; BCg = balón colgado; BL = balón lanzado; BC = balón colocado; JR = situación de juego real, ND = no descrito

Tabla 3. Resumen de estudios que relacionan noveles y expertos.

Artículo	Edad noveles	Edad expertos	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Ziv et al., 2010	-	-	-	-	Revisión de estudios sobre la influencia del salto vertical en jugadores y jugadoras de voleibol
Copic et al., 2014	Mujeres no jugadoras 21,3 ± 1,2	Mujeres jugadoras 22 ± 3,7 y 11,8 ± 4	-	-	Composición corporal y fuerza muscular como predictores del rendimiento en el salto
Bisagno et al., 2013	Chicos y chicas de un club italiano 12 ± 3,35 y 3 ± 3,63 años de experiencia	Jugadores y jugadoras de un club italiano 21 ± 1,73 y 11,3 ± 4,73 años de experiencia	BC	Z: z IV D: a un objetivo	Crecimiento de la capacidad de aprendizaje y la memoria de trabajo en tareas básicas del voleibol

Artículo	Edad noveles	Edad expertos	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
Bisagno et al., 2015	Chicos y chicas de un club italiano de 5 a 17	Jugadores y jugadoras de un club italiano de 18-26 con al menos 10 años de experiencia	BC	Z: z IV D: a un objetivo	Examinar si la memoria de trabajo tiene capacidad predictiva en el aprendizaje motor de la CBR
Bisagno et al., 2018	Chicos y chicas de un club italiano de 5 a 17	Jugadores y jugadoras de un club italiano de 22,2 ± 2,5 y 10 años de experiencia mínima	BC	Z: z IV D: a un objetivo	Examinar el rol de la memoria de trabajo como variable cognitiva para aprender la CBR
Pastuszak et al., 2016	Mujeres no entrenadas 20 ± 6,4	Jugadoras de voleibol polacas 21,6 ± 1,5 y 8,4 ± 3,4 años de experiencia	-	-	Somatotipo y composición corporal en el voleibol entre jugadoras y un grupo no entrenado de referencia

Artículo	Edad noveles	Edad expertos	Tipo de interacción con el balón	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Objetivo del estudio
García-De-Alcaraz Serrano et al., 2015	Jugadores de equipos de Categorías infantil, cadete y juvenil	Jugadoras de equipos de la Superliga española y de selecciones pertenecientes a los Juegos Olímpicos de Pekín	-	Z: todas D: ND	Efecto del grupo edad en el rendimiento técnico-táctico del remate

SB = sin balón; BCg = balón colgado; BL = balón lanzado; BC = balón colocado; JR = situación de juego real; ND = no descrito

A partir de los estudios que comparan a jugadores noveles con expertos, se evidencia que las características que pueden llegar a diferenciar el PM de la CBR son diversas. Por una parte, la velocidad de la mano en el instante del impacto del balón, siendo mayor en expertos (hombres expertos (16,3 m/s), mujeres expertas (12,4 m/s) y hombres noveles (13,9 m/s) y mujeres noveles (11,2 m/s)) (Serrien et al., 2016a). En cuanto a la fase del armado y el momento del golpeo, los expertos tenían la posición del codo más alta y extendida con una velocidad de extensión mayor, lo cual se relaciona con una mayor velocidad en el impacto instantáneo (Serrien et al., 2016a). También Serrien (2016b) mostró cómo, en hombres, la velocidad para la aducción horizontal del hombro y el ángulo de rotación del hombro fue más alta para los deportistas expertos. Además, la velocidad del tronco en el plano sagital, la velocidad de rotación del tronco y la velocidad de inclinación lateral del tronco también fueron más altas en los deportistas expertos.

Como podemos observar, la mayoría de las diferencias entre expertos y noveles se producen en las acciones realizadas durante la fase de vuelo, en las que los matices y la pulidez del gesto técnico es más determinante, siendo la experiencia un valor añadido tanto para la ejecución como para el filtrado y gestión de la información en el momento de golpear el balón. Además, el hecho de no haber diferencia entre noveles y expertos en los ángulos de orientación de la pelvis y el tronco durante el movimiento en global (Serrien et al., 2016a) nos permite apuntar que en esta fase el PM es bastante estable.

### **3.7. Posiciones de juego en el voleibol**

El voleibol, por su estructura de juego y sus sistemas tácticos, promueve que los jugadores, a medida que aprenden a jugar, se vayan especializando en diferentes posiciones de juego. Estas posiciones son, concretamente, las de colocador/a, punta, opuesto/a, central y líbero.

El/la colocador/a es el/la jugador/a que gestiona, salvo excepciones, el segundo toque en el juego, distribuye el juego y coordina a sus compañeros en el diseño de las jugadas de ataque. En sistemas tácticos con el/la colocador/a siempre delantero/a, como el 4R-2C o el 3R-3C, la especialización hace que la CBR se limite a algún ataque de segundo toque. En las variantes tácticas del 6R-2C y el 6R-3C el/la colocador/a hace las funciones de atacante cuando ocupa las posiciones delanteras del campo, por lo que el uso de la CBR será habitual. En sistemas tácticos

avanzados como el 5R-1C el uso de la acción de la CBR se limita, otra vez, al ataque de segundo toque, teniendo un uso residual. El uso y la práctica de la CBR en colocadores/as especializados/as es residual en los entrenamientos y en la propia competición.

El/la punta es el/la jugador/a atacante, habitualmente del lado izquierdo del campo, que tiene la función de recibir el saque rival. El rendimiento obtenido en la CBR es fundamental para el desarrollo de su juego ya que el remate es una de sus especialidades. Habitualmente realiza la CBR cerca de la antena por el lado izquierdo del campo. Debe dominar diferentes registros al realizar la CBR para responder a colocaciones altas de terceros tiempos o más rápidas (súper) de dos tiempos. Además, deberá poder atacar desde segunda línea, habitualmente desde zona VI. El volumen de ataques realizados por parte del jugador de punta es muy elevado tanto en la competición como en el entrenamiento.

El/la opuesto/a es el/la jugador/a especialista atacante del lado derecho del campo, que aparece en sistemas tácticos avanzados como el 5R-1C, en el que solo hay un/a colocador/a y se sitúa en posición contraria al/la opuesto/a en la rotación. Es un/a jugador/a que no realiza labores de recepción, sino que es responsable de labores ofensivas. Su principal baza es el dominio de diversos registros al realizar la CBR. Habitualmente se encarga de rematar por la zona derecha del campo tanto por zona II en la primera línea de ataque, como por zona I en la segunda línea de ataque. El volumen de ataques realizados por parte del/la opuesto/a es muy elevado tanto en la competición como en el entrenamiento.

El/la central es el/la jugador/a especialista que ataca por la zona central del campo. La CBR es una acción fundamental para su desempeño y tiene unas características de ejecución especiales por la proximidad con el colocador. Debe dominar los ataques altos con posibilidad de lectura de trayectoria de 2 y 3 tiempos, como son los ataques con anticipación tales como los de primer tiempo. El volumen de ataques realizados por parte del jugador central es muy elevado tanto en la competición como en el entrenamiento.

El/la líbero es el/la jugador/a especialista defensivo. Se responsabiliza de la defensa y recepción del equipo rival y, en algunos momentos, también puede colocar. No puede atacar para pasar el balón al otro campo, por lo que no utiliza la CBR en competición y solo la ejecuta de forma residual en los entrenamientos.

Los estudios muestran cómo para ganar un partido los/las deportistas que mayor influencia tienen para terminar los puntos en los equipos ganadores son los/las puntas, seguidos de los/las opuestos y los/las centrales (Grgantov et al., 2018; Stankovic et al., 2019). Además, los/las puntas son los/las que más volumen de ataques realizan, tanto en fase de cambio de saque como en contrataque.

A nivel de investigaciones que observen las diferencias entre los/las jugadores/as por posiciones de juego, sin entrar en las posibles diferencias entre hombres y mujeres, encontramos en la literatura científica análisis de las capacidades antropométricas o del somatotipo de los jugadores en todas las posiciones de juego (Giannopoulos et al., 2017; Mielgo-Ayuso et al., 2015; Milić et al., 2017; Sheppard et al., 2009). En cuanto a las diferencias de rendimiento en el salto, encontramos análisis para los/as colocadores/as, centrales y puntas (Sinsurin et al., 2017), para los/as centrales, puntas y opuestos/as (Vaverka et al., 2016) y para todas las posiciones (Gonçalves et al., 2019; Sattler et al., 2015; Skazalski et al., 2018). En cuanto a los estudios del rendimiento de diferentes partes de la CBR, hay estudios con centrales (Zahálka et al., 2017), con puntas (Kuhlmann et al., 2011; Lobietti, 2010), con puntas y centrales (Hsieh & Christiansen, 2010), con puntas, centrales y colocadores/as (Wagner et al., 2012) y con los habitualmente atacantes: centrales, puntas y opuestos (Giannopoulos et al., 2017; Sarvestan et al., 2020). En ninguno de ellos se analizan las posibles diferencias en el PM de la CBR en función de los años de especialización.

### **3.7.1. El ataque por las diferentes zonas del campo**

La descripción del modelo técnico de la CBR es, a grandes rasgos, el mismo para todas las zonas del campo (Figura 13), salvo matices temporales, como el ataque en anticipación o semianticipación a colocaciones de primer y segundo tiempo, de lateralidad con los ángulos de entrada óptima hacia la red, según el brazo dominante para la CBR, o técnicas avanzadas de remate como son la CBR a una pierna, la CBR en profundidad, la CBR con batida lateral o la CBR con doble fase de batida (Valadés Cerrato, 2005). Estas técnicas avanzadas al realizar la CBR son consideradas como patrones de movimiento diferentes. Sin embargo, el cambio temporal, de momento del juego (ataque o contrataque) o de lateralidad no lo son, así como tampoco el ángulo con el que se hace la CBR hacia la red, dependiendo de la posición del campo desde la que se realiza la CBR.

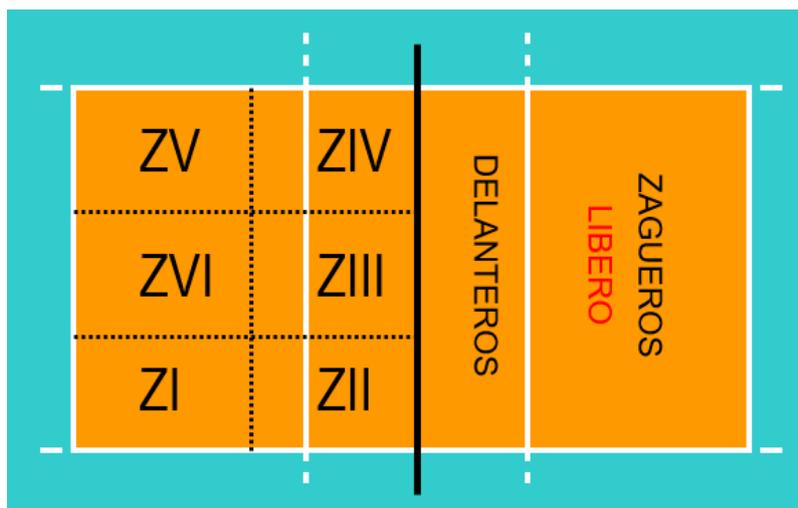


Figura 13. Zonas del campo por las que se puede realizar la CBR y situación de los/as jugadores/as en él, en función de su cercanía a la red (delanteros/as y zagueros/as).

Las zonas de ataque utilizadas habitualmente son, para los/as jugadores/as de primera línea, la zona de frente derecha, la zona de frente central y la zona de frente izquierda (zonas II, III y IV, respectivamente). Los/as jugadores/as de segunda línea suelen atacar desde la zona trasera central (zona VI) y la zona trasera derecha (zona I). En el voleibol moderno, a pesar de que se empiezan a ver cada vez más, los ataques desde la zona V son muy raros. Hay dos razones principales para explicar este fenómeno. En primer lugar, durante la defensa suele haber un libero en esa zona que no puede rematar. Y en segundo lugar, los ataques se realizan mayoritariamente por la zona IV, tanto en la fase de construcción desde la recepción como en el contrataque, por los atacantes de punta, por lo que, tácticamente, no es lo más apropiado acumular ataques desde las zonas IV y V (Grgantov et al., 2018).

En los estudios realizados por Palao et al. (2007), analizando los Juegos Olímpicos de Sidney 2000, tanto en femenino como en masculino, vieron cómo en la fase de cambio de saque, los/as jugadores/as que más participaron fueron los/as opuestos/as (23,4%), seguidos/as de los/as atacantes de punta (22,4% cada uno) y los/as centrales (12,2% cada uno). En el contrataque, los/as jugadores/as que más participaron fueron los/as atacantes de punta (27,3% cada uno), seguidos de los/as opuestos/as (24,2%) y de los/as centrales (10,5% cada uno). En las dos fases del juego el porcentaje de ataque más alto fue por zona IV y el segundo por zona II.

Grgantov et al. (2018) describieron el uso de las zonas del campo para el ataque en partidos de Champions League masculina entre 2008 y 2012 (Tabla 4). La zona IV, en porcentaje de uso total (39,6%), fue la más usada en la suma de las dos fases del juego (cambio de saque y

contrataque), así como la parte derecha del campo por zona II tuvo un porcentaje de uso del 19,1%, muy elevado si tenemos en cuenta que en solo tres de las seis rotaciones el/la opuesto/a puede atacar por esa zona del campo, frente a un 19,4% de uso en la zona III, pero con la posibilidad de usarla en las seis rotaciones del juego. Es por eso por lo que podemos considerarlas las dos zonas de ataque más determinantes para ganar un partido en voleibol.

Tabla 4. Número de remates realizados por zona durante 55 partidos de la Champions masculina (Grgantov et al., 2018).

Zona	n total	(%)	Equipos ganadores		Equipos perdedores	
			n	(%)	n	(%)
I	1631	15,31	783	15,47	848	15,16
II	2007	18,84	962	19,01	1045	18,68
III	2151	20,19	1031	20,37	1120	20,02
IV	4191	39,33	1943	38,39	2248	40,18
VI	675	6,33	341	6,73	334	5,96
total	10655	100	5060	100	5595	100

n= número de remates realizados desde esa zona

A pesar de las diferencias de uso en función de la zona y de las particularidades que implica realizar el remate desde cada una de ellas, la CBR se sigue entendiendo como un PM único para todas las posiciones. Probablemente por esta razón no se encuentran estudios que analicen la CBR por diferentes zonas. En general, los estudios analizan los ataques realizados por zona IV (Bergun et al., 2009; Bisagno & Morra, 2018; Coleman et al., 1993; Fuchs, Fusco, et al., 2019; Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Garrido-Castro et al., 2017; Kumar & Kumar, 2020b, 2020a; Liu et al., 2001; Marquez et al., 2009; Richards et al., 1996, 2002; Serrien et al., 2016a), combinados, en algunos estudios, con ataques por zona I (Chen & Huang, 2008), zona VI (Masumura et al., 2009, 2008) y zona II (Brown & Waller, 2014), o incluso analizando solo los ataques por zona III (Sarvestan et al., 2020; West et al., 2014; Zahálka et al., 2017). A pesar de que técnicamente está descrita una diferencia en el ángulo de entrada a la red para realizar la CBR, ya sea por la parte derecha o por la izquierda del campo, y que hay estudios que observan la gran diferencia en el tipo de aterrizaje entre las zonas (Lobietti, 2010), no hemos encontrado estudios que analicen posibles diferencias en la realización de la CBR por diferentes zonas del campo.

### **3.8. Formas de analizar la carrera batida de remate**

Los instrumentos de medida han evolucionado muchísimo en la última década, permitiendo tomar medidas durante los entrenamientos y competiciones mediante el uso de sensores muy poco invasivos y de reducido tamaño (Huang et al., 2012; Kos et al., 2016; Moras et al., 2018; Peng et al., 2019; Teufl et al., 2019; Yu et al., 2016). Esto permite analizar la CBR en el contexto del juego real, donde los/as jugadores/as tienden a presentar los mejores rendimientos dada su alta especificidad. Aun así, se encuentran pocos estudios en los que se haya medido el PM de la CBR durante los partidos (Coleman et al., 1993; Marquez et al., 2011), donde la presencia adicional del bloqueo y la defensa condicionan el movimiento. Por esto, debemos considerar una limitación en nuestro campo de investigación que este tipo de estudios se realicen mayoritariamente en condiciones de laboratorio, muchos de ellos con el balón colgado para establecer de forma precisa la altura de golpeo para el atacante (Oliveira et al., 2020). Debemos tener en cuenta que, al realizar una CBR para golpear un balón colgado, las fases de aproximación y de batida se asemejarán más a una acción de CBR sin balón por no existir la necesidad de coordinarse con un objeto móvil. Otra variante de estudio más cercana a la realidad es cuando se realiza la CBR para golpear un balón que es lanzado por un colocador o un entrenador experimentado. La variante que permitirá al atacante tener referencias más semejantes al juego real será aquella en que el balón es colocado por un/a colocador/a (Oliveira et al., 2020).

Las tablas 5 y 6 muestran diferentes estudios categorizados por el tipo de análisis que han realizado de la CBR.

Para la variable de modelo de CBR, describiremos las condiciones de semejanza respecto al movimiento libre de la CBR en situación de juego real. SB: la CBR se ha realizado sin balón; BCg: la CBR se ha realizado con el balón colgado; BL: la CBR se ha realizado con el balón lanzado; BC: la CBR se ha realizado con el balón colocado; BJ: la CBR se ha realizado durante el transcurso de la competición.

Tabla 5. Estudios que han medido la CBR mediante cinemática 3D

Artículo	Modelo CBR	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Número de cámaras	Características estudiadas
Chen et al., 2008	BC	Z: z IV, z I D: entre los 3 y 9 metros	2 videocámaras (JVC9800, 120Hz)	Análisis de la CBR en ataque por zona IV y por zona I
Zahálka et al., 2017	BC	Z: z III D: ND	3 SONY HDR-HC9E	Diferencias cinemáticas entre dos tipos de CBR en el centro de la red
Masumura et al., 2008	JR	Z: ND D: ND	2 high-speed VTR cámaras (250 Hz, 1/2000 s)	Análisis biomecánico del remate <i>pipe</i> en jugadores de élite en partidos oficiales
Masumura et al., 2009	JR	Z: ND D: ND	2 high-speed VTR cámaras (250 Hz, 1/2000 s)	Implicaciones para la mejora técnica del ataque <i>pipe</i> comparado con la CBR en primera línea
Chen et al., 2011	BC	Z: z IV D: diagonal sobre un objetivo en la esquina de z V	2 cámaras (JVC9800, 250Hz)	Diferencias cinemáticas entre las CBR de hombres y mujeres

Artículo	Modelo CBR	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Número de cámaras	Características estudiadas
Fuchs, Menzel et al., 2019	BCg	Z: ND D: ND	14 Vicon MX-13 cámaras (250Hz) Cleveland Clinical Marker set, Visual3D software (C-Motion)	Diferencias biomecánicas de la CBR entre hombres y mujeres
Fuchs, Fusco et al., 2019	BCg	Z: ND D: ND	12 Vicon MX-13 cámaras (250Hz) Cleveland Clinical Marker set, Visual3D software (C-Motion)	Movimientos característicos del rendimiento de la CBR en mujeres
Coleman et al., 1993	JR	Z: zIV D: Varios ataques	2 cámaras de cine Photo-Sonics Biomechanics 500 (100Hz)	Análisis 3D cinemático de la CBR en el juego
Guo, 2000	JR	Z: Varios D: ND	2 SONYDOYVX-100 videocámara digital Fourth-order Butterworth and Low-pass Digital Filter (6HZ) method	Análisis cinemático de los remates de jugadores de élite en partidos oficiales
Kuhlman et al., 2011	BC	Z: varios D: ND	4 cámaras digitales (BASLER A602fc-2) (100Hz)	Análisis del centro de gravedad en la fase de aproximación y su influencia en el salto de la CBR
Serrien et al., 2016	BC	Z: ND D: Remate centrado	6 cámaras Vicon 3D motion capture system (250 Hz) + High-frequency Casio Exilim camera (210Hz)	Análisis del movimiento y del rendimiento de la CBR con cinemática 3D

Artículo	Modelo CBR	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Número de cámaras	Características estudiadas
Tilp et al., 2008	BCg	Z: ND D: ND	8 cámaras Vicon 3D motion capture system (250Hz)	Diferencias en cinemática 3D de la CBR en voleibol y vóley playa
Richards et al., 1996	BL	Z: z IV D: ND	4 high-speed video digitizing (200 Hz) + Kintrak Motion Analysis software	Análisis de las extremidades inferiores en la CBR
Richards et al., 2002	BL	Z: z IV D: ND	4 high-speed video digitizing (200 Hz) + VP 320 Kintrak Motion Analysis software	Análisis de las extremidades inferiores en la CBR
Bergun et al., 2009	BC	Z: z IV D: ND	2 Sony DCR-TRV330E camcorders (50Hz) + SIMI motion program	Análisis de las extremidades superiores en la CBR
Wagner et al., 2009	BCg	Z: z III D: Remate centrado	8 cámaras Vicon 3D motion capture system (250Hz)	Análisis cinemático de la CBR
Marquez et al., 2009	BC	Z: z IV D: diagonal	8 cámaras Vicon 3D motion capture system (250Hz) + Visual 3D	Análisis del tronco y las extremidades en la CBR
Reeser et al., 2010	BC	Z: ND D: Diagonal y línea	8 cámaras EVaRT 5.0 Motion Analysis Corporation (240Hz)	Análisis de las extremidades superiores en la CBR

Artículo	Modelo CBR	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Número de cámaras	Características estudiadas
Marquez et al., 2011	JR	Z: z IV D: diagonal	2 cámaras high-speed VTR (250Hz) + Frame-Dias IIVTR digitizer	Análisis de la CBR en partidos de competición
Mitchinson et al., 2013	BCg	Z: ND D: Diagonal y línea	8 cámaras Vicon 3D motion capture system (250Hz) + Vicon motion analysis	Análisis de las extremidades superiores en la CBR
West et al., 2014	BCg	Z: z III D: ND	14 cámaras Vicon 3D motion capture system (250Hz) + LabVIEW program	Cinemática de la rodilla en la CBR
Wagner et al., 2014	BCg	Z: ND D: ND	8 Vicon 3D motion capture system (250Hz) + Vicon Nexus software	Análisis de las extremidades superiores en la CBR
Brown et al., 2014	BCg	Z: z II y z IV D: Línea y diagonal	10 cámaras Raptor-E Digital Real Time Camera System (120Hz)	Análisis del tronco y las extremidades superiores en la CBR
Seminati et al., 2015	BC	Z: ND D: Línea	8 Vicon 3D motion capture system (250Hz) + High Frequency Casio Exilim camera (210Hz)	Análisis de las extremidades superiores en la CBR

Artículo	Modelo CBR	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Número de cámaras	Características estudiadas
Garrido-Castro et al., 2017	BC	Z: z IV D: Detrás de la zona de 3 m	5 cámaras high-speed Basler az A640-100 gc (100 Hz) + UCO track system	Análisis de la cinemática de la CBR
Serrien et al., 2018	BC	Z: ND D: Remate centrado	6 cámaras Vicon 3D motion capture system (250 Hz) + High-frequency Casio Exilim camera (210Hz)	Análisis del movimiento y del rendimiento de la CBR con cinemática 3D. Influencia de la edad y el género

CBR= Carrera batida de remate; SB= la CBR se ha realizado sin balón; BCg= la CBR se ha realizado con el balón colgado; BL= la CBR se ha realizado con el balón lanzado; BC= la CBR se ha realizado con el balón colocado; JR= la CBR se ha realizado durante el transcurso de la competición; ND= información no descrita.

Tabla 6. Estudios que han medido alguna fase de la CBR mediante plataformas de fuerza.

Artículo	Modelo CBR	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Número de plataformas	Variables estudiadas
Laffaye et al., 2014	-	-	1 en el despegue y el aterrizaje	Salto vertical. Variables fuerza-tiempo en diferentes deportes
Vaverka et al., 2016	-	-	1 en el despegue y el aterrizaje	Impulso y fuerza media en la fase de frenado. Impulso y fuerza media en la fase de aceleración en CMJ
Zahradnik et al., 2014	SB	-	2 en el aterrizaje	Fuerzas verticales en el suelo en salto de bloqueo y CBR
Wagner et al., 2009	BCg	Z: z III D: Remate centrado	1 en la fase de batida	<i>Squat Jump</i> , Counter movement jump y CBR en la fase de batida de la CBR
Copic et al., 2014	-	-	1 fase de despegue y aterrizaje	CMJ con balanceo de brazos y sin balanceo en jugadoras de élite y no entrenadas
Elvin et al., 2007	-	-	1 en el aterrizaje	Saltos verticales de 6 tipos: salto alto caída dura; salto alto caída suave; salto medio caída dura; salto medio caída suave; salto bajo caída dura; salto bajo caída suave

Artículo	Modelo CBR	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Número de plataformas	Variables estudiadas
Fuchs, Menzel et al., 2019	BCg	Z: ND D: ND	2 en la fase de batida	Pasos de la CBR en las fases de aproximación y de batida
Fuchs, Fusco et al., 2019	BCg	Z: ND D: ND	2 en la fase de batida	Pasos de la CBR en la fase de batida, impulso de frenado e impulso de aceleración
Liu et al., 2001	ND	Z: z IV D: ND	1 en la fase de batida	Pasos de la CBR en la fase de batida, impulso de frenado e impulso de aceleración, saltando a 50 cm, 100 cm y 150 cm del balón
Marquez et al., 2009	BC	Z: z IV D: diagonal	1 en la fase de batida	Aterrizajes en la CBR con previo salto normal o salto largo
Kabacinski et al., 2017	SB	-	1 en el aterrizaje	Fuerzas de reacción en el suelo para el aterrizaje de la CBR y del bloqueo
Coutts et al., 1982	SB	-	1 en la fase de batida	Dos tipos de fase de batida, dos pies simultáneos y pies consecutivos en la CBR
Salci et al., 2004	SB	-	1 en el aterrizaje	Aterrizajes de la CBR y del bloqueo

Artículo	Modelo CBR	Zona del campo (Z) Dirección del ataque (D)	Número de plataformas	Variables estudiadas
Sinsurin et al., 2017	SB	-	1 en el aterrizaje	Siete tipos de aterrizaje desde diferentes ángulos y direcciones
Ciapponi et al., 1996	SB	-	1 en la fase de batida	Fase de batida de la CBR, impulso de frenado e impulso de aceleración
Jandova et al., 2019	-	-	1 en el despegue	<i>Squat Jump</i> , CMJ y 45 segundos de salto continuo en jugadoras de voleibol élite y subélite
Huang et al., 2002	SB	-	1 en la fase de batida	Dos tipos de fase de batida, dos pies simultáneos y pies consecutivos en la CBR
Cronin et al., 2008	BL	Z: ND D: ND	1 en el aterrizaje	Aterrizaje sin <i>feedback</i> y aterrizaje con <i>feedback</i> previo

CBR= Carrera batida de remate; SB= la CBR se ha realizado sin balón; BCg= la CBR se ha realizado con el balón colgado; BL= la CBR se ha realizado con el balón lanzado; BC= la CBR se ha realizado con el balón colocado; JR= la CBR se ha realizado durante el transcurso de la competición; ND= información no descrita.

A partir de la literatura acumulada en todos los estudios realizados, podemos destacar que una de las posibilidades de mejora en los diseños de estudios de análisis lineal de la CBR consiste en que esta se realice en condiciones lo más similares posible a las del juego real para poder acercarse así a los parámetros que se pueden llegar a dar en él. Otra posibilidad, en esta línea de mejora de los estudios, es utilizar diferentes velocidades de colocación para poder observar divergencias en los patrones de movimiento de la CBR ante la adaptación temporal.

La propuesta del análisis no lineal de la CBR es algo que podría dimensionar el gesto técnico que marca la diferencia en el juego, no desde una perspectiva reduccionista, considerando la suma de los parámetros de aquello que sucede en cada fase, sino desde una perspectiva global, en la que se pueda analizar la serie temporal completa, así como la VM y la complejidad de la CBR ante diferentes condicionantes que se pueden encontrar en el juego: el golpeo del balón, la zona del campo por la que se realiza la CBR, el tiempo de ataque, la presencia del bloqueo, el momento competitivo...

### **3.9. Las fuerzas de impacto en el voleibol: medidas e influencia**

Cuando hablamos de impacto en una actividad física, nos referimos a la fuerza que se genera al golpear nuestro cuerpo contra un obstáculo, provocando así deformaciones en nuestros tejidos. Este impacto, cuando no es excesivo, puede tener efectos beneficiosos sobre el tejido óseo en lo que respecta a su crecimiento, su consolidación y su densidad (Faienza et al., 2020; Krabak et al., 2019; Loud et al., 2005; Silva et al., 2003; Tenforde & Fredericson, 2011; Vlachopoulos et al., 2017). No obstante, someterlo reiteradamente a fuerzas de impacto elevadas puede provocar lesiones de diversa gravedad, como lesiones en los ligamentos de la rodilla (Kabacinski et al., 2017) o tendinopatías por sobrecarga (Cassell, 2001; Ferretti et al., 1990; Reeser et al., 2006; Rice & Anderson, 1994; Schafle, 1993).

A pesar de que el voleibol no es un deporte de contacto, como el rugby o el fútbol, el número de lesiones sufridas en el entrenamiento y la competición es elevado (Briner & Kacmar, 1997). El número medio de saltos realizados durante un partido de voleibol de cinco sets, por jugadores, es de 96 (Fontani et al., 2000), llegando a sumar muchos más saltos en las sesiones de entrenamiento. Se calcula que un/a jugador/a atacante efectúa unos 40 000 saltos de remate en una temporada (Kugler et al., 1996). Así, un 63% de las lesiones en el voleibol tienen su origen

en la gran cantidad de impactos producidos durante el aterrizaje en todas las acciones con salto (Gerberich et al., 1987). Los estudios muestran la evolución histórica y la recurrencia en el tipo de lesiones. Un 15% de las lesiones ocurrieron en la fase de aterrizaje (Watkins & Green, 1992); el 60% de las lesiones agudas ocurrieron al aterrizar después de un bloqueo o una CBR con o sin contacto con otro jugador (Cassell, 2001); la práctica excesiva también se mostró como un factor que ocasionó el 65% de las lesiones de rodilla por fenómenos inflamatorios (Rice & Anderson, 1994; Schafle, 1993). Otros estudios epidemiológicos mostraron prevalencias en las tendinopatías rotulianas en el 40-50% de deportistas de alto nivel (Ferretti, 1986; Ferretti et al., 1983, 1990) por el exceso de práctica habitual y los impactos producidos en el aterrizaje. Además, los/as jugadores/as atacantes pueden tener problemas de tipo lumbar, como la espondilólisis (fractura por estrés de una vértebra), fruto de la acción de la CBR en dos momentos que resultan críticos, por las fuerzas de corte que se producen en el momento de torsión e hiperextensión lumbar en la preparación para el golpeo, y por las fuerzas de impacto resultantes de un aterrizaje defectuoso o forzado (Eerkes, 2012). Cuando sucede esto de forma repetitiva, se puede desarrollar una fractura por estrés, siendo los/as adolescentes los/as más vulnerables a ello debido a la debilidad de sus vértebras. Este tipo de lesión es especialmente delicada ya que, si se produce una fractura, suele cronificarse, conllevando la recomendación de dejar la práctica del voleibol (Eerkes, 2012). Por este motivo es importante que la técnica, tanto del armado y el golpeo como del aterrizaje, se realice correctamente, pues se trata de dos fases en las que se suele incidir más en el rendimiento de la acción que en la pulidez técnica de la CBR. Medir el alcance de estas fuerzas de impacto en el deporte en general, y en el voleibol en particular, ha sido una constante a lo largo de la historia, tratando de evaluar el impacto que tienen en el cuerpo humano y tratando de optimizar el movimiento para conseguir más altura de salto con menos impacto en el aterrizaje.

El primer instrumento de medida utilizado han sido las plataformas de fuerza o de contacto, siendo este el instrumento más utilizado en el voleibol (Ciapponi et al., 1996; Copic et al., 2014; Coutts, 1982; Fuchs, Fusco, et al., 2019; Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Huang et al., 2002; Jandova & Janura, 2019; Kabacinski et al., 2017; Laffaye et al., 2014; Liu et al., 2001; Marquez et al., 2009; Salci et al., 2004; Sinsurin et al., 2017; Vaverka et al., 2016; Wagner et al., 2009; Zahradnik et al., 2014). No obstante, el valor de estas mediciones es limitado, ya que no nos puede dar una referencia exacta sobre qué partes de la estructura osteoarticular y en qué medida están siendo afectadas por las fuerzas de impacto generadas.

Con la aparición de sensores de pequeñas dimensiones y peso que incorporan uno o más acelerómetros, la medida de las fuerzas de impacto se ha podido realizar en diversas partes del cuerpo humano. Así, han aparecido estudios que han medido: las fuerzas de impacto en la tibia durante la acción de caminar (Lucas-Cuevas et al., 2013; Tirosh et al., 2017); las fuerzas de impacto en la tibia durante la carrera (Glassbrook et al., 2020; Milner et al., 2019; Moresi et al., 2013; Raper et al., 2018; Van den Berghe et al., 2019), tanto con acelerómetros uniaxiales como triaxiales; las fuerzas de impacto en el tobillo después de un salto con acelerómetros triaxiales (Quagliarella et al., 2010, 2006); las fuerzas de impacto producidas por los diferentes tipos de aterrizaje en un salto medido con tres acelerómetros uniaxiales, en tibia, muslo y en la quinta vértebra lumbar (L5) (Elvin et al., 2007); las fuerzas de impacto producidas por el desplazamiento lateral diferenciando entre condiciones voluntarias e inesperadas (Lucas et al., 2018).

Por lo que respecta al voleibol, Jarning (2015) realizó un estudio para evaluar la frecuencia de saltos en tiempo real en los jugadores de voleibol. Para ello, situó un acelerómetro en la zona lumbar (L5) mediante un cinturón adaptado. Con esta propuesta pudo regular y controlar la carga con el objetivo de reducir o evitar lesiones por sobreuso.

El uso de los acelerómetros uniaxiales para medir las fuerzas de impacto tiene unas limitaciones puesto que, en el momento del impacto, no todas las fuerzas convergen en el mismo eje. Por esta razón, es más aconsejable utilizar acelerómetros triaxiales, los cuales mostrarán la incidencia del impacto en los tres ejes. Para simplificar el análisis de datos, a menudo los estudios expresan la fuerza de impacto a través del módulo (Fernández-Valdés, 2020; Moras et al., 2018) que se calcula a través de la ecuación (2):

$$a_t = \sqrt{z^2 + y^2 + x^2} \quad (2)$$

Ecuación 2. Cálculo del módulo de la aceleración de los tres ejes x, y, z.

## Resumen del capítulo

En el voleibol, las acciones realizadas próximas a la red, como el remate y el bloqueo, son las que más influyen sobre el resultado del juego (Iglesias, 1994; Valadés Cerrato, 2005). Los puntos logrados por el remate suponen más del 70% de los puntos logrados en competición. El remate es, por lo tanto, la acción técnica a través de la cual se consigue el mayor porcentaje de puntos (Palao et al., 2004; Zhang, 2000) y la que presenta una mayor correlación con el resultado final de los partidos (Cox, 1974; Díaz, 1996; Eom, 1989; Häyrinen et al., 2004, 2000; Marelic et al., 1998; McCughton, 1998; Moutinho, 2001; Palao et al., 2004; Santos, 1992), concluyendo así que la eficacia de la acción de remate es el factor más determinante en el juego y el que marca la diferencia entre los ganadores y los perdedores, independientemente del género (Valadés Cerrato, 2005)

El rendimiento obtenido en la CBR viene determinado por la adecuada reproducción del modelo técnico básico, generando así un PM que le permita optimizar el movimiento para obtener el máximo rendimiento: la máxima altura de golpeo y lograr imprimir la máxima velocidad posible al balón. El modelo técnico de la propuesta de esta tesis contendrá 5 fases que nos permitirá detallar cada paso de la CBR: 1) fase de carrera de aproximación (1.<sup>er</sup> paso: paso de orientación ( $a1$ )); 2) fase de batida (2.<sup>o</sup> paso: impulso de frenado ( $a2$ ), y 3.<sup>er</sup> paso: impulso de aceleración ( $a3$ )); 3) preparación del golpeo; 4) golpeo ( $a4$ ); 5) fase de aterrizaje ( $a5$ ). Este modelo técnico de una habilidad compleja como la CBR formará un PM específico para la CBR compuesto por los tres tipos de patrones fundamentales de movimiento: patrón locomotor y patrón de equilibrio (durante toda la CBR) y patrón manipulativo (momento del golpeo del balón en el aire). En cuanto a la evolución cualitativa de y del aprendizaje motor de un PM se dividen en tres etapas: Estadio inicial, Estadio elemental y Estadio Maduro. Se alcanza el estadio maduro del PM de una habilidad compleja cuando la ejecución es conforme al modelo formal de referencia, proceso independiente a la edad y sin carácter cronológico. La práctica, la experiencia adquirida y la maduración de los diferentes sistemas del cuerpo como son el sistema nervioso central y los sistemas sensoriales como la visión.

La influencia de la percepción visual para interceptar el balón en su trayectoria podría ser un factor que influya en la VM de la CBR, tanto entre noveles y expertos como en relación con la zona del campo desde la que se lleve a cabo el golpeo, ya que deberemos conseguir coordinar el momento de salida de la carrera de aproximación y ajustar la velocidad de ésta para

determinar el lugar exacto de la realización del salto y lograr la máxima altura posible en una posición respecto al balón que nos permita golpearlo en el punto más alto del salto, sin necesidad de adoptar posturas no deseadas. En el mecanismo de percepción de información y toma de decisión a nivel funcional, tendremos el *input* o entrada de información a través de los órganos sensoriales, los procesos de toma de decisión que se realizan en los mecanismos centrales y el *output* o salida de los datos del sistema nervioso central para que el sistema muscular realice la acción, produciéndose un *feedback* con la efectividad de la respuesta. Para poder llegar a anticipar la trayectoria de un objeto en movimiento es necesario conocer cuatro tipos de información: 1) información sobre la posición del objeto en el espacio; 2) información sobre la dirección del desplazamiento del objeto; 3) información sobre la velocidad de desplazamiento del objeto; 4) información sobre la aceleración o desaceleración que sufre el objeto en el recorrido de su trayectoria, siendo necesario que las habilidades visuales de un individuo integren correctamente la información recibida por: los movimientos oculares (seguimientos, sacádicos, reflejos óculo-vestibulares y vergencias, la percepción de la profundidad (estereopsis), la percepción del contraste, la agudeza visual estática y dinámica (capacidad de discriminar detalles), la eficacia visual (habilidad de rendir adecuadamente sin que aparezca fatiga visual), la acomodación (capacidad de cambiar de enfoque de forma rápida y precisa, para ver con nitidez a diferentes distancias) y la amplitud del campo visual (parcela de la realidad que capta el ojo cada vez que hace una panorámica del entorno). La CBR con el condicionante del balón, es un proceso de interceptación de anticipación en el que a diferencia de otros conceptos (tiempo de reacción, tiempo de reacción electiva y anticipación), el estímulo no es fijo y no se manifiesta súbitamente, sino que perdura y es móvil y/o variable en el tiempo, obligando al deportista a adaptar su respuesta al movimiento que perciba. Los factores principales que influyen en la percepción de la trayectoria en una habilidad como la CBR con balón, serán: La trayectoria de curva irregular del balón, las condiciones ambientales (temperatura, humedad, ...), las especificaciones del balón y la situación del sujeto, si está realizando otra acción diferente al mismo tiempo.

En cuanto a la evolución técnica de la CBR desde la iniciación hasta el rendimiento, en la literatura científica no se encuentran estudios donde se analicen las diferencias en la técnica de la CBR según la categoría, aunque algunos autores apuntan que se debería tener en cuenta diferentes patrones de enseñanza para cada categoría ya que tienen unas características físicas, emocionales, mentales, psicológicas y madurativas distintas que justifican a nivel normativo, diferentes alturas de la red. En los estudios que comparan deportistas noveles con expertos, se

observa que la mayoría de las diferencias se producen en las acciones realizadas durante la fase de vuelo, en las que los matices y la pulidez del gesto técnico es más determinante, siendo la experiencia un valor añadido tanto para la ejecución como para el filtrado y gestión de la información en el momento de golpear el balón.

Por lo que respecta a las posiciones de juego específicas tendrán importancia en el uso habitual de la CBR durante el juego, siendo las puntas y opuestas las que suman más acciones y las líberos y colocadoras las que menos, con las jugadoras de posición central que habitualmente realizarán la CBR a mayor velocidad. Este hecho hace que las zonas por las que más acciones de remate se producen durante los partidos sean la derecha y la izquierda (un 33,84% y un 40,18% respectivamente).

La CBR se ha analizado principalmente mediante estudios de cinemática 3D y con plataformas de fuerza. Estas herramientas son difíciles de implementar en los estudios en los que se pretende estudiar el movimiento deportivo en condiciones lo más similares posible a las del juego real. La aparición de acelerómetros uniaxiales primero y de los dispositivos IMU permitió medir la aceleración triaxial en diferentes partes del cuerpo al realizar la CBR en situaciones y contextos similares o muy próximos al juego real pudiéndose incluso tomar datos durante partidos de entrenamiento o en la propia competición.



## **4. LOS DISPOSITIVOS IMU Y SU UTILIZACIÓN EN EL DEPORTE**



Un IMU es una unidad de medición inercial (del inglés *inertial measurement unit*). Es un dispositivo electrónico que mide e informa acerca de la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales de un aparato, usando una combinación de acelerómetros, giroscopios, GPS (sistema de posicionamiento global), barómetro y magnetómetro (Chambers et al., 2015). Aunque las unidades de medición inercial son normalmente usadas para maniobrar aviones, incluyendo vehículos aéreos no tripulados, entre muchos otros usos, cada vez más se utilizan en el entorno deportivo. La incorporación de receptores GNSS o GPS los convierte en una herramienta muy potente, poco invasiva y fácil de utilizar, pudiéndose colocar en estuches pequeños, bolsillos, o en chalecos ligeros y adaptables (Chambers et al., 2015). Estos dispositivos, comúnmente denominados “sensores portátiles”, facilitan el análisis y el movimiento detallado en tiempo real y permiten identificar movimientos y patrones de actividad específicos del deporte (Boyd et al., 2011; Chandler et al., 2014; Cormack et al., 2014; Montgomery et al., 2010), haciendo un esfuerzo por evaluar mejor las demandas del deporte y para ayudar con la preparación física, la prevención de lesiones y el análisis técnico de estas actividades (Cummins et al., 2013; Cunniffe et al., 2009; Gabbett et al., 2012; Wisbey et al., 2010).

Primeramente, se utilizaron para detectar patrones de movimiento en las actividades físicas de la población en general (Plasqui & Westerterp, 2007); posteriormente, se evaluó la marcha al correr (J. B. Lee et al., 2010; Y. S. Lee et al., 2015) y, progresivamente, se usaron para ayudar a describir los movimientos específicos del deporte (Fernández-Valdés, 2020; Huang et al., 2012; Kos et al., 2016; Moras et al., 2018). Los sensores que incorporan actualmente los IMUS permiten seleccionar frecuencias de muestreo de 100 hasta 1000 Hz, (Matijevich et al., 2019; Moras et al., 2018) y pueden medir en tres dimensiones (anterior-posterior, vertical y medial-lateral), la ocurrencia y la magnitud (Boyd et al., 2011). Este hecho ha permitido que se puedan empezar a diseñar estudios en deportes de sala para empezar a comprender el movimiento deportivo de estos, olvidados hasta ahora por la imposibilidad de usar la señal GPS.

Actualmente, estos sensores se han convertido en una potente herramienta para entrenadores y preparadores físicos, que les permite monitorizar los entrenamientos y, a veces, la propia competición, tanto en deportes al aire libre como el rugby (Cunniffe et al., 2009; T. J. Gabbett et al., 2012), el fútbol australiano (Boyd et al., 2011; Wisbey et al., 2010) y otros como el fútbol y el hockey (Cummins et al., 2013), como en deportes de sala como el baloncesto

(Benson et al., 2020; Montgomery et al., 2010). En todos ellos permite estudiar las demandas físicas y fisiológicas de los deportistas y sus demandas de movimiento físico (aceleraciones, deceleraciones, patrones de movimiento, distancias recorridas). Los IMU han ayudado a describir distancias, intensidades y frecuencias en el contexto de partido, una información útil para ajustar las cargas de los planes de entrenamiento (McLellan et al., 2011; Piggott, 2008; Waldron et al., 2011) y estructurar los programas de prevención de lesiones (Gabbett et al., 2012). Además, han ayudado a realizar estudios en los que los microsensores permiten detectar con precisión movimientos específicos del deporte en todo tipo de entornos y deportes, ya sean individuales o colectivos.

En deportes individuales, como en el tenis, se ha demostrado la detección de golpes específicos durante la competición y el entrenamiento (Ahmadi et al., 2009; Connaghan et al., 2011); en el golf se han detectado errores de rotación en la muñeca durante la acción de golpeo (Ghasemzadeh et al., 2009); en la marcha atlética se han observado patrones legales e ilegales de la marcha (Lee et al., 2013); ha permitido clasificar los diferentes tipos de salto de trampolín (Helten et al., 2011) y describir la técnica del lanzamiento de disco (Ganter et al., 2010).

En los deportes de equipo se ha utilizado tanto para analizar la realización técnica como para poder aportar *feedback* a los deportistas (Chambers et al., 2015). Así, en el béisbol, se pudo discriminar entre un bateo con mala frecuencia y sincronía y uno con buena (Ghasemzadeh & Jafari, 2011) o el movimiento del lanzamiento (Koda et al., 2010); en cricket se ha usado para evaluar a los jugadores de rápido boteo (McNamara et al., 2015); en rugby, para llevar a cabo la descripción de sus placajes (Gabbett et al., 2010; Kelly et al., 2012), como también se ha hecho con los *tackles* del fútbol australiano (Gastin et al., 2013, 2014) y también se ha usado para medir la carga del jugador y su riesgo lesional en el baloncesto (Benson et al., 2020; Montgomery et al., 2010).

En los estudios con IMU dedicados al voleibol podemos ver las diferentes utilidades que se le han atribuido: proponer nuevos sistemas de *feedback* para el aprendizaje de habilidades (Haider et al., 2020; Salim et al., 2019); cuantificar la carga y definir patrones de riesgo de lesiones (Hansen et al., 2019); medir la altura del salto en la CBR (Jaitner et al., 2017) y el volumen y la carga que suponen a los jugadores (Skazalski et al., 2018); contar el número de saltos y su altura en los entrenamientos (MacDonald et al., 2016); monitorizar las acciones de juego de los jugadores en vóley playa (Kautz et al., 2017); medir la carga de salto, tanto en entrenamiento

como en competición (Skazalski et al., 2018); mejorar el *feedback* durante y después de los entrenamientos y competiciones (Umek & Kos, 2020), o evaluar el rendimiento de la CBR y categorizar al deportista por nivel competitivo, según su técnica de ejecución (Wang et al., 2018). Todos estos estudios se han realizado mediante análisis lineales con dispositivos con la capacidad de medir a 100 Hz como máximo. Los registros realizados hasta 100 Hz no recogen todos los picos del movimiento, pudiendo modificar sustancialmente valores de la aceleración media, muy importante para poder cuantificar acciones cortas y explosivas (como las que se dan en el voleibol), por lo que las medidas recogidas a esta frecuencia de muestreo no nos permitirán evaluar de forma efectiva la VM con herramientas no lineales (Fernández-Valdés, 2020).

La capacidad de recoger datos de series temporales a 1000 Hz abre la posibilidad de llevar a cabo el análisis no lineal del movimiento, permitiendo cuantificar la VM de la habilidad técnica mediante el uso de la entropía (entropía aproximada, entropía muestral, entropía multiescala...); por esta razón, en nuestros estudios hemos usado el IMU como herramienta de medida para poder evaluar un gesto técnico de una habilidad compleja como es la CBR. Nos ha permitido, con su posicionamiento en la L5, situarlo cerca del centro de gravedad y poder evaluar el movimiento completo desde el centro de masas de la jugadora, facilitando así la descripción de las diferencias en el movimiento del cuerpo cuando se realiza la CBR con los diferentes condicionantes estudiados (con balón, sin balón, por la derecha y por la izquierda del campo).



## **5. LA VARIABILIDAD DEL MOVIMIENTO DESDE LA PERSPECTIVA DE LA TEORÍA GENERAL DE SISTEMAS DINÁMICOS**



La Teoría General de Sistemas Dinámicos considera a los seres vivos como seres complejos, dinámicos y abiertos. Esta consideración apunta a la necesidad de analizar la VM humano desde nuevas perspectivas. La Teoría General de Sistemas Dinámicos establece los principios en los que se fundamenta la variabilidad de los sistemas.

## **5.1. El ser humano como sistema complejo, dinámico y abierto**

Un sistema complejo está compuesto de muchos elementos que interactúan entre sí, dando lugar a diferentes comportamientos observables (Urbán et al., 2015).

Históricamente, las teorías de Newton sobre las leyes de la gravitación y el movimiento universal han sido las que han explicado la naturaleza de todo y sus comportamientos a través de una sucesión de causas y consecuencias lineales y reversibles que determinan la naturaleza de las cosas. Esta perspectiva, considerada de carácter reduccionista, estudia la globalidad como la suma de todas sus partes y las interacciones entre ellas. Es inevitable que, a la hora de estudiar grandes sistemas complejos, no sea suficiente basarse en estas teorías, ya que no tienen en cuenta la interacción de los sistemas con las condiciones o entornos que los rodean. Se pudieron tener en cuenta estas interacciones a partir de la formulación de la *teoría del caos* propuesta por Lorenz (Lorenz, 1963) y de la aparición de herramientas de análisis no lineal. Sin embargo, no podemos obviar que previamente, aun en el siglo XIX, Henri Poincaré describió por primera vez que un sistema determinístico exhibe comportamientos irregulares que dependen sensiblemente de las condiciones iniciales, haciendo así imposibles las predicciones a largo plazo (citado por Strogatz, 1994). Las tesis formuladas por Poincaré no tuvieron aceptación hasta la aparición de ordenadores potentes que permitieron realizar ciertas aproximaciones matemáticas, empezándose a vislumbrar en ese momento lo que posteriormente han sido los sistemas de cálculo no lineales. Así, Edward Lorenz, en 1963, analizó en sus primeros experimentos el movimiento caótico en un atractor extraño, descubriendo la gran sensibilidad de los sistemas no lineales al cambio de las condiciones iniciales. Fue de esta forma que se describió el llamado efecto mariposa, que refleja cómo cambios pequeños en las condiciones iniciales de un sistema pueden influenciar a aspectos mucho mayores posteriormente. Estos fueron los primeros pasos de lo que hoy denominamos *teoría del caos*.

En los estudios de la *teoría del caos*, que está contenida en la Teoría General de los Sistemas Dinámicos, se distinguen dos enfoques diferentes (Hayles, 1990): el orden oculto existente en los sistemas caóticos y la autoorganización como ordenación espontánea de las estructuras que surgen en condiciones alejadas del equilibrio sistémico. Los procesos no lineales y los sistemas en los que inestabilidad y estabilidad conviven alejados de la condición de equilibrio son algunos de los factores en común que tienen los dos enfoques. La *teoría del caos*, de esta forma, permite caracterizar la complejidad y describir un sistema dinámico complejo.

La Teoría General de los Sistemas Dinámicos considera que los sistemas biológicos son sistemas complejos que, desde un punto de vista macroscópico, están formados por elementos que interactuarán entre sí y con su entorno. El ser humano como sistema biológico es un sistema complejo compuesto por elementos internos (músculos, órganos, huesos...) interactuando entre ellos y con el entorno, realizando todo tipo de movimientos, agarres, lanzamientos o carreras que son el fruto de esta interacción.

Para comprender las características que delimitan los sistemas complejos debemos conocer los elementos que lo componen (Moreno & Ordoño, 2009):

### **5.1.1. Grados de libertad**

Fue Bernstein (1967) quien, con su estudio sobre cómo dominar la redundancia de los grados de libertad para resolver el problema de los sistemas de movimiento, sentó las bases para el análisis del movimiento en la Teoría General de los Sistemas Dinámicos. El término “redundancia” fue usado por Bernstein para hacer referencia a los grados de libertad que exceden del mínimo número requerido para completar satisfactoriamente una tarea motora (Vereijken et al., 1992). En un sistema, los grados de libertad se definen por el número de posibilidades de interacción de los elementos del sistema entre sí. La complejidad del sistema se definirá por el número de grados de libertad, aumentando su complejidad con el aumento de interacciones posibles del sistema (Newell & Vaillancourt, 2001). El ser humano tiene la capacidad de disminuir a nivel conductual la complejidad de un sistema, reduciendo los grados de libertad, bloqueando alguna articulación para controlar mejor el movimiento, lo que genera las llamadas sinergias musculares. Estas sinergias pueden considerarse estrategias neurales que crean patrones de coactivación, en los que varios grupos de músculos responden a la vez a un estímulo emitido por un único comando neural (Bernstein, 1967).

### **5.1.2. Concepto de no linealidad**

Los sistemas complejos tienen un comportamiento no lineal, que describieron por primera vez en movimientos humanos Kelso et al. (1981) y Kelso (1984), descripción ampliada posteriormente por Haken et al. (1985). Los estudios consistieron en analizar tareas bimanuales que debían ajustarse a una frecuencia que iba aumentando de forma sistemática para provocar una transición entre dos patrones de diferente estabilidad. Observaron una no linealidad del sistema y la irreversibilidad de los cambios que se producían.

### **5.1.3. Parámetros de control y de orden**

Los parámetros de control se definen como la totalidad de influencias posibles sobre el sistema que se puedan modificar o alterar para provocar un cambio en el comportamiento de los elementos del sistema. De esta forma, el sistema tiene una dependencia en su comportamiento respecto a los parámetros de control del entorno. Estos parámetros provocarán unos cambios que generarán un nuevo comportamiento en forma de una nueva autoorganización en el sistema, que generará nuevos patrones de comportamiento denominados parámetros de orden (Kelso et al., 2000; Newell, 1986).

### **5.1.4. Histéresis**

La histéresis es una característica que define la dependencia de la progresión de los patrones de comportamiento de un sistema en función de la direccionalidad de los cambios en los parámetros de control, y la persistencia de los cambios aun en ausencia del parámetro de control. La permanencia de los cambios dependerá, en gran medida, de la capacidad de resistencia del sistema a los parámetros de control introducidos, así como de la fuerza de los atractores que definan su comportamiento (Urbán, 2015).

### **5.1.5. Autoorganización**

Otra característica de los sistemas complejos es que son abiertos, por lo que constantemente están intercambiando energía con su entorno, situándose lejos del equilibrio. Este hecho les dota de una capacidad de adaptación llamada autoorganización que, mediante procesos estables, permite crear comportamientos espontáneos como respuesta a las condiciones determinadas por el entorno.

El concepto de autoorganización es definido como la característica de los sistemas complejos que facilita la formación espontánea de patrones de comportamiento, permitiendo la aparición de un nuevo estado de equilibrio (Kelso et al., 2000), y se manifiesta como las transiciones que se producen entre los estados de organización, que surgen como consecuencia de los condicionantes internos o externos a los que son sometidos y que están presentes en los sistemas complejos (Newell, 1986).

### **5.1.6. Estabilidad y atractores en un sistema dinámico complejo**

Todos los sistemas buscan la estabilidad, el equilibrio y el intercambio energético mínimo. Así, la resistencia al cambio de un sistema definirá el grado de estabilidad de un patrón de comportamiento. Los desequilibrios en un sistema son provocados por un parámetro de control, lo que lleva de nuevo al sistema a buscar su equilibrio, realizando con los elementos que lo forman una interacción nueva. Por eso, cuando hay un patrón estable, las magnitudes de los parámetros de control deberán ser muy altas. A estos patrones de organización estables del sistema se les denomina atractores ya que provocan una tendencia a organizarse como ellos (Urban, 2015).

La Teoría General de los Sistemas Dinámicos entiende la VM como un factor funcional que se puede manifestar en diferentes comportamientos humanos. Se han estudiado diferentes patrones de variabilidad vinculados a la fisiología del cuerpo humano (Goldberger et al., 1984, 1988; Kaipust et al., 2012; Myers et al., 2011), observando que una variabilidad concreta puede, en cierta manera, definir la salud del sistema. Desde otra perspectiva se muestra la VM como un elemento imprescindible para que los sistemas funcionen, por lo que el valor de la variabilidad se podría entender como un índice de la habilidad de adaptación del sistema (Adami et al., 2000; Davids et al., 2003; Goldberger et al., 2002; Latash, 1993; Lipsitz, 2002; Newell et al., 1993; Rabinovich & Abarbanel, 1998; Riley & Turvey, 2002; Vaillancourt & Newell, 2002).

A su vez, la VM se ha relacionado con la flexibilidad y la capacidad de adaptación ante entornos cambiantes (Latash et al., 2003; Newell et al., 1993). Esta capacidad de incrementar la VM como compensación a los cambios que se observan en el entorno ha sido descrita recientemente en diversos estudios. Caballero (2019), a través de un análisis no lineal de la variabilidad mediante la entropía borrosa, nos describe cómo los sujetos aumentan su

variabilidad en la marcha cuando las condiciones de rigidez del suelo cambian y cuando la amplitud de la vía para caminar aumenta, disminuyendo la variabilidad a medida que la vía se estrecha. En cambio, al analizar la variabilidad de forma lineal a través de la desviación estándar, se observan aumentos en la VM y pequeños cambios en el PM de la carrera por la montaña al adaptarse a los desniveles del terreno, las condiciones climáticas o las diferencias entre superficies. Estas variaciones adaptativas del PM podrían prevenir lesiones crónicas producidas por el excesivo número de repeticiones realizadas con un PM similar (Hamill et al., 2006).

Scholz y col. (2000), (a través de la desviación estándar de 57 marcadores cinemáticos), y Ko et al. (2017), de forma no lineal (a través de la entropía multiescala), analizaron tiradores de pistola de diferentes niveles. Scholz observó que los tiradores expertos tenían valores superiores de VM en hombros y codos, pero una mayor estabilidad de la muñeca y, por tanto, en la pistola. En los tiradores de nivel inferior se mostró una disminución de la variabilidad en estos elementos, dándole una rigidez al brazo que impidió a la mano alcanzar la estabilidad necesaria. Por otro lado, en el estudio de Ko et al. (2017), se analizó la variabilidad del centro de presiones de los tiradores encima de una plataforma de fuerzas mientras disparaban. Los tiradores expertos mostraron una menor VM que los noveles, que sufrían mayor inestabilidad anteroposterior y lateral, obteniendo valores más altos de variabilidad. El hecho de que la complejidad dependa de la experiencia del movimiento postural, del movimiento de la pistola y de las diferencias en sus patrones de coordinación, refleja la consecuencia de un proceso de control, inducido por la práctica, para realizar un desempeño experto en la tarea de apuntar. De nuevo, en estudios con análisis lineales de la VM (a través de la desviación estándar de 5 parámetros cinemáticos) se observó el mismo comportamiento que en jugadores de tenis de mesa expertos que mostraban una mayor variabilidad en el inicio del movimiento, teniendo valores muy bajos en el momento del golpeo (Bootsma & van Wieringen, 1990). Se interpretaron estos resultados como una respuesta funcional de los jugadores experimentados, como una capacidad de explorar las diferentes posibilidades y adaptarse a las necesidades del golpeo teniendo un mayor control sobre la bola.

La relación entre la VM y el aprendizaje motor se describió en estudios sobre el desarrollo motor en niños, donde se sugería que el aumento de variabilidad mostrado en la transición de su desarrollo motor se producía en el momento previo a la adopción de un nuevo

nivel de comportamiento. De esta forma, la VM genera procesos de exploración en los niños y les permite encontrar diferentes soluciones ante los estímulos (Thelen & Smith, 1994).

Algunos autores, a través de estudios realizados con análisis lineales, apuntan que la modificación en la VM producida durante los procesos exploratorios en los periodos críticos de aprendizaje se puede relacionar con el grado de voluntariedad, de atención o de intencionalidad con la que se hace la tarea, siendo la VM el resultado del equilibrio entre el control voluntario (muy determinista) y el involuntario (muy aleatorio), resultante de la ejecución de la tarea en un contexto específico (Kloos & Van Orden, 2010; Van Orden, 2010).

Por otro lado, diversos estudios realizados con análisis no lineales han permitido asociar los mayores valores de VM, medidos con entropía, a mayores niveles de incertidumbre o de variabilidad en el sistema (Lai et al., 2005). Una menor VM puede ser debida a un mayor control voluntario, al tener que prestar mayor atención para conseguir el equilibrio en la tarea. Y que los valores de la VM suban, al responder a la tarea mediante automatismos motores, puede ser consecuencia de la disminución del control voluntario (Borg & Laxaback, 2010). Estas relaciones entre cantidad de atención y grado de complejidad han sido estudiadas por muchos autores (Donker et al., 2007, 2008; Roerdink et al., 2006; Schmit et al., 2006; Stins et al., 2009).

En cuanto a los estudios que relacionan la complejidad con la intencionalidad y los valores de la VM, debemos destacar el estudio realizado con una tarea de punteo para identificar los efectos de la amplitud y la frecuencia como condicionantes intencionales (Washburn et al., 2013). Se observó cómo los ajustes realizados ante los condicionantes intencionales modificaron la estructura de la variabilidad (resultando una estructura similar al ruido blanco, una estructura completamente innovadora, caótica, sin ninguna redundancia) y se encontraron diferencias entre ambos condicionantes en la anti-persistencia obtenida en los ajustes realizados sobre la frecuencia del movimiento (Washburn et al., 2013). De forma similar, los estudios que relacionan la complejidad con la temporalidad también observaron un desplazamiento de la estructura de la variabilidad hacia el ruido blanco cuando se trataba de ajustarse a un parámetro temporal (Kuznetsov & Wallot, 2011). Cuando hemos hablado de conceptos como procesos voluntarios, de acción e intencionalidad, lo hemos abordado desde todas las perspectivas actuales, aunque no queda definida de forma concreta una correlación entre la modificación de la estructura de la variabilidad y los procesos de intencionalidad o voluntariedad en la tarea. No obstante, la aparición de *feedback* en la precisión de la tarea para conseguir rendimiento se presenta como

una posibilidad para reducir las demandas de control voluntario y se asocia a un comportamiento más impredecible (Delignières & Torre, 2009).

La variabilidad es una característica inherente de la naturaleza que se observa de manera prominente en los sistemas biológicos (Newell et al., 1993) y, por lo tanto, en el ser humano, siendo esta una característica que diferencia a todas las personas, haciéndolas únicas. Estas particularidades se muestran en nosotros tanto a nivel de apariencia externa (color de piel, altura...) observables a simple vista, como a nivel interno (genética, número de glóbulos rojos, etc.). Además, a nivel emocional y psicológico cada persona tiene unos gustos y unas tendencias que la diferencian de los demás. Así pues, a nivel de movimiento humano podemos prever que también somos únicos y que nuestros movimientos generan patrones propios que serán como nuestra huella digital, fruto de sus características morfológicas y su historial (Couceiro et al., 2014).

## **5.2. La variabilidad del movimiento humano**

La VM humano se describe como el conjunto de variaciones habituales que se producen durante la ejecución de múltiples repeticiones de una misma tarea (Glass & Mackey, 1988; Newell, 1998; Stergiou et al., 2006). La VM ha sido analizada durante la ejecución de diferentes acciones motrices tales como el lanzamiento del tiro libre en baloncesto (Button et al., 2003; Hamilton & Reinschmidt, 1997; Jennings et al., 2010; Liu & Burton, 1999; Miller, 2002; Robins et al., 2006), el saque en tenis (Chow et al., 2003; Menayo et al., 2010, 2012; Urbán et al., 2012), el *putt* en el golf (Couceiro et al., 2014; Dias et al., 2014), el lanzamiento de jabalina (Best et al., 1995; Morriss et al., 1997), así como en acciones cotidianas de la vida diaria que implican movimientos de alcance de objetivos y agarre (Darling et al., 1993; Jaric et al., 1999; Perez & Nussbaum, 2006; Worringham, 1991).

El interés por encontrar una explicación a la VM en los humanos se remonta al siglo XIX. El primer estudio relacionado con la VM fue realizado por Woodworth en 1899, quien describió este fenómeno con un experimento llevado a cabo mediante la realización de una tarea que consistía en marcar líneas durante el desplazamiento de un punto a otro, ajustándose a una secuencia temporal marcada por el sonido emitido por un metrónomo (Vaillancourt & Newell, 2002). Posteriormente, Bernstein (1967) describió la VM humano como una forma de estudiar el control motor. Bernstein (1967) argumentaba que la inexistencia de repeticiones exactas de

un mismo gesto indicaba que cada ejecución formaba parte de una única repetición, como un acto único en el que se implicaban patrones neurales y motores diferentes. Actualmente, la VM humano ha sido estudiada por numerosos estudios (Moon et al., 2016; Preatoni et al., 2013) bajo diferentes perspectivas.

Usando los preceptos cognitivos, y a partir de la Teoría del Esquema Motor (Schmidt, 1975), apareció la Teoría de la Variabilidad del Impulso con la que Schmidt et al. (1979) trataron de explicar la VM humano. Bajo esta perspectiva, la VM se interpretaba como ruido o fluctuaciones aleatorias de los mecanismos neuromusculares durante la ejecución de un programa motor, que se reflejaba en una traducción inexacta a la actividad neuromuscular que limita el control del sistema, desembocando en errores en el proceso de transmisión de los programas motores a la actividad neuromuscular, que deberían ser eliminados o minimizados (Newell, 1998; Williams et al., 1999) con el fin de optimizar y mejorar el control del movimiento. Con la práctica, la variabilidad mostrada en el movimiento se reduce a medida que se incrementa el nivel de habilidad. No obstante, ese ruido no es eliminado completamente, observándose como fluctuaciones aleatorias del movimiento. Desde esta perspectiva, la variabilidad ha sido interpretada como medida de rendimiento y, por tanto, como un medio para valorar la eficacia del sistema sensoriomotor (Sherwood et al., 1988).

La variabilidad como medida de rendimiento ha sido abordada tradicionalmente mediante procedimientos que evaluaban la variabilidad de la ejecución (o de la fuerza) y la variabilidad del resultado. La variabilidad de la fuerza hace referencia a las fluctuaciones producidas a nivel neuromuscular durante contracciones musculares sucesivas como resultado de la transmisión del impulso, lo que provoca modificaciones en la aceleración de los segmentos corporales que, a su vez, desemboca en un incremento o disminución de la velocidad, al igual que en contracciones isométricas provoca variaciones durante la aplicación de una fuerza (Mckeen et al., 1892; Newell & Carlton, 1988; Newell & Carlton, 1985; Schmidt et al., 1979; Sherwood et al., 1988; Sherwood & Schmidt, 1980; Slifkin & Newell, 1999). La variabilidad de la fuerza también se puede denominar variabilidad en la ejecución, entendiendo esta como la desviación de una secuencia de movimientos o posiciones articulares durante la ejecución repetida de una misma tarea respecto a un criterio establecido previamente y que es estudiada mediante variables cinéticas o cinemáticas (Menayo et al., 2010; Miller, 2002; Sabido et al., 2009; Scholz et al., 2000; Urbán et al., 2012, 2015).

Por otro lado, se define como “variabilidad del resultado” a las variaciones en las consecuencias externas de una acción, siendo medidas a través de los valores de dispersión de los resultados obtenidos durante la realización de la tarea (Bartlett et al., 2007; Hernández-Davo et al., 2014; Schmidt et al., 1979; Urbán et al., 2015). Por ejemplo, en la tarea de disparar con una pistola a una diana se puede conseguir, en disparos consecutivos, la máxima puntuación si se acierta el objetivo en todos ellos. En este caso, se podría decir que el tirador ha tenido una variabilidad de ejecución baja o nula. No obstante, si además de analizar el resultado, analizáramos variables de rendimiento motor, como los ángulos de sujeción de la pistola o la rigidez del hombro, el codo y la muñeca, obtendríamos valores diferentes que no habrían afectado al resultado (Ko et al., 2018). Estas variaciones internas a nivel neuromuscular hacen a cada tiro diferente, generando una VM humano que no afecta al resultado. De esta forma, medir únicamente la variabilidad del resultado no nos da una respuesta fiable a la VM del ejecutante.

El rendimiento motor ha sido tradicionalmente evaluado mediante el análisis de la magnitud de la variabilidad en función a un parámetro externo o relativo al ejecutante, analizando una secuencia de repeticiones de una misma tarea. Dicha magnitud ha sido cuantificada por medio de herramientas de análisis lineal, que ofrecen información sobre la dispersión de los datos en función de la media de la distribución, siendo ésta el promedio de un conjunto de valores ( $n_1, n_2, n_3 \dots n_\infty$ ), calculada como la suma del conjunto de valores dividida entre el número de ensayos  $N$  (3). Para obtener información sobre el grado de dispersión de los datos respecto a un valor promedio, el estadístico más utilizado es la desviación típica de la distribución, análisis que permite evaluar las disminuciones o incrementos de la variabilidad. Este estadístico calcula la raíz cuadrada de la varianza, entendida la varianza como el promedio del cuadrado de la distancia de cada punto respecto del promedio (4). Otro de los estadísticos utilizados es el coeficiente de variación, que se calcula como la medida de dispersión relativa de un conjunto de datos relativos a la media de los valores obtenidos (5) (Urbán et al., 2015).

$$(3) \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} \quad (4) S = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{n}} \quad (5) CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\%$$

La hipótesis sobre la que se ha sustentado históricamente el aprendizaje de habilidades motrices consiste en tratar de incrementar la eficacia y, por lo tanto, el rendimiento, mediante

la reducción de la variabilidad mostrada por el aprendiz (Newell et al., 1993). Así, en el deporte se ha utilizado el entrenamiento y el aumento en la densidad de la práctica para obtener un mayor rendimiento reduciendo la variabilidad en los movimientos entrenados. En este sentido, se promueve la idea de que para llegar a ser experto/a en una tarea se deben realizar al menos 10 000 horas de práctica significativa (Hossain et al., 2011). Hay estudios que apoyan esta hipótesis como una disminución continua de la VM en las diversas variables cinemáticas, por ejemplo: sobre el lanzamiento en el béisbol a medida que el jugador accede a un nivel competitivo superior (Fleisig et al., 2009; Stodden et al., 2005); sobre una disminución lineal de la variabilidad de movimiento en el lanzamiento de disco, con un rendimiento creciente (Dai et al., 2013); sobre la disminución en la VM en el lanzamiento de balonmano en carrera para los jugadores profesionales y expertos pertenecientes a altos niveles de habilidad (Wagner et al., 2012); y sobre gimnasia, donde se vio una clara relación entre la mejoría mecánica y el rendimiento técnico (Hiley et al., 2013). No obstante, a pesar de la mejora de rendimiento obtenida por los/as deportistas con el entrenamiento, siempre se detecta cierta variabilidad en cualquiera de los parámetros que analicemos.

No obstante, cada vez se encuentran más estudios que ponen en duda la fiabilidad del valor de la variabilidad para clasificar el rendimiento, encontrando altos niveles de variabilidad en individuos con un alto nivel de rendimiento (Cazzola et al., 2016; Preatoni et al., 2010). Es por ello por lo que se defiende la existencia de una relación en forma de U entre la VM y el nivel de habilidad. Los/as deportistas noveles presentan una alta variabilidad y un bajo nivel de habilidad. A medida que aumentan su habilidad se reduce su VM, hasta que se alcanza un alto nivel de habilidad donde, de nuevo, aumenta la VM sin deteriorar el rendimiento motor (Wilson et al., 2008). Así, estudios realizados en diferentes deportes observan un aumento de la VM en deportistas expertos: concretamente, se encontraron valores de mayor variabilidad en el ángulo de lanzamiento en jugadores de baloncesto expertos comparado con jugadores noveles (Miller, 2002), en la VM de la muñeca en los tiros libres (Button et al., 2003) y en el lanzamiento de balonmano (Schorer et al., 2007).

Sin embargo, en gimnasia se observó una disminución continua de la VM, llegando a la conclusión de que, probablemente, los movimientos que requieren precisión tienden a una disminución de la VM a lo largo del tiempo mientras que los movimientos que requieren adaptabilidad a las perturbaciones externas tienen una evolución de la VM en forma de U (Hiley

et al., 2013). La colocación del dispositivo IMU en la zona lumbar de los deportistas (como ha sido el caso en los estudios de esta tesis doctoral), con el objetivo de analizar la VM a partir del módulo de la señal de aceleración, puede considerarse una medida global que refleja en cierta manera el producto de los movimientos de las diferentes partes del cuerpo. Por esta razón, creemos que la evolución de la VM de un movimiento deportivo como la CBR debería ser en forma de L.

En relación con estas propuestas de la Teoría de la Variabilidad del Impulso, la psicología cognitiva, influenciada por la termodinámica y fundamentada en la Teoría de los Sistemas Dinámicos (Kelso, 1995; Prigogine & Stengersova, 1984; Kelso & Engstrom, 2006) y en la psicología ecológica (Davids et al., 2008; Gibson, 1979; Turvey, 1996), ha planteado una alternativa con el propósito de explicar los posibles comportamientos y transiciones que puedan ocurrir en un sistema. Desde este punto de vista, se deja de prestar atención a los procesos internos para dirigir el estudio del comportamiento motor a las relaciones entre la dinámica intrínseca del individuo, las características de la tarea y el entorno en el que se desarrolla, evaluando el comportamiento motor observando sus interacciones (Urbán et al., 2015). Esta nueva perspectiva ha propiciado un cambio en el paradigma del estudio de la variabilidad, dejando de considerar los grados de libertad del sistema como errores o ruido, para convertirse en la cuestión central de estudio, como característica del cuerpo humano (Hernández-Davo et al., 2014; Newell et al., 1993; Sabido et al., 2009). De esta forma, se interpretará la variabilidad como una característica funcional, más allá de su interpretación como error indeseable del sistema (Davids et al., 2003; Newell, 1998; Riley & Turvey, 2002). La VM desempeñará la función de favorecer la exploración del entorno y, por tanto, de mejorar la organización del sistema y el rendimiento. Tradicionalmente, la literatura científica ha analizado la VM humano como el resultado de interacciones no lineales con propiedades y origen deterministas (Urbán et al., 2015). Así, azar y determinismo han sido considerados en base a la no predictibilidad de los procesos aleatorios frente a la predictibilidad de los procesos deterministas. Sin embargo, existen ciertos tipos de procesos que poseen ambas características, aleatorias y deterministas, en los que, a pesar de que las trayectorias se rigen por ecuaciones deterministas, las predicciones precisas de los estados futuros son difíciles o imposibles de lograr (Amato, 1992; Deffeyes et al., 2009; Dingwell & Cusumano, 2000; Glass & Mackey, 1988; Gleick, 1997; Miller et al., 2006; Riley & Turvey, 2002).

## **5.3. El análisis de la variabilidad del movimiento**

La VM ha sido objeto de medida y estudio desde hace muchos años, a pesar de las limitaciones que suponía la utilización de análisis lineales a través del promedio, la desviación típica y el coeficiente de variación, con los que solamente se podía medir la magnitud de los cambios respecto a un punto. Estos índices no podían medir la VM en el tiempo (Stergiou & Decker, 2011), perdiéndose información relevante sobre la VM (Harbourne & Stergiou, 2009; Newell et al., 1993).

Con la aparición de los sistemas de análisis no lineal fue posible medir la variabilidad desde su estructura temporal y su complejidad (Stergiou et al., 2006). A partir de ese momento, aumentó el interés en evaluar la VM desde una perspectiva no lineal (Borg & Laxaback, 2010; Busa & van Emmerik, 2016; Caballero et al., 2019; Couceiro et al., 2014; Couceiro et al., 2013; Delignières & Torre, 2009; Ko et al., 2018; Kudo, 2008; Moras et al., 2018; Stergiou et al., 2006). En este sentido se encuentran estudios en los que se evalúa la variabilidad inter-intentos (Moras et al., 2018; Ko et al., 2018; Couceiro et al., 2013) y otros que miden la variabilidad inter-individuos (Couceiro et al., 2014, Borg & Laxaback, 2010; Busa Van Emmerik, 2016).. Actualmente, disponemos de muchas herramientas para medir la VM a través de sistemas no lineales, como la entropía aproximada, la entropía muestral, la entropía multiescala, la entropía borrosa...

### **5.3.1. La entropía como magnitud de medida para el análisis no lineal de la variabilidad del movimiento**

La entropía es un concepto abstracto, que tiene su origen en la termodinámica (West, 1990), pero que, en su posterior aplicación al movimiento humano, nos ha ayudado a entender la realidad más allá del paradigma clásico en el que existía una visión natural del equilibrio y la estabilidad de los sistemas. Así, la entropía nos ayuda a medir la VM a través de la cuantificación de la regularidad de una serie temporal (Pincus, 1991).

Unos valores bajos de entropía muestran una complejidad menor del sistema y, por el contrario, valores altos de entropía indican una mayor complejidad del sistema.

A continuación, exponemos los algoritmos más utilizados para medir la entropía.

### 5.3.1.1. Entropía aproximada

La entropía aproximada ( $ApEn$ ) fue introducida por primera vez por Pincus como una medida para caracterizar la regularidad en datos relativamente cortos y potencialmente ruidosos (Pincus, 1991). Más específicamente,  $ApEn$  cuantifica el grado de irregularidad o aleatoriedad dentro de una serie de tiempo (de longitud  $N$ ) y ya ha sido ampliamente aplicada a sistemas biológicos (no estacionarios) para monitorear dinámicamente la «salud» del sistema (Balasis et al., 2013). La idea conceptual tiene sus raíces en el trabajo de Grassberger y Procaccia (1983) y hace uso de las distancias entre secuencias de observaciones sucesivas.  $ApEn$  analiza la serie temporal para detectar períodos similares, de manera que, cuando los períodos son más similares y repetidos, se obtienen valores más bajos de  $ApEn$  (Balasis et al., 2013).

Los valores de  $ApEn$  más pequeños indican una mayor probabilidad de que un conjunto de datos vaya seguido de datos similares (Grassberger, 1983), es decir, mayor regularidad. Por el contrario, los valores más grandes de  $ApEn$  apuntan hacia una menor probabilidad de datos repetibles (irregularidad), es decir, más desorden, aleatoriedad y complejidad del sistema. En otras palabras, un valor de  $ApEn$  bajo/alto refleja un grado de regularidad alto/bajo.

Las técnicas para estimar la entropía aproximada pueden considerarse como un proceso representado por una serie temporal y estadísticas relacionadas (Pincus, 1991).

Tras el desarrollo de este algoritmo, Pincus demostró que, en comparación con otros algoritmos no lineales,  $ApEn$  podría diferenciar entre series temporales ruidosas y caóticas con una serie relativamente corta de unos 1000 datos (Pincus, 1991). Además, se ha sugerido que  $ApEn$  también podría usarse en conjuntos de datos más cortos, de unos 75 a 100 puntos (Pincus, 1995; Pincus & Huang, 1992). Esto resultó ser esencial para investigadores que trabajan con humanos, ya que es difícil adquirir series temporales largas, particularmente cuando los estudios se realizan con sujetos que padecen algún tipo de patología o con personas mayores. Concretamente, se ha estudiado la regularidad de las señales del centro de presiones en tareas de control postural y equilibrio, relacionándola con el envejecimiento o la presencia de patologías (Cavanaugh et al., 2007; Deffeyes et al., 2009; Haran & Keshner, 2008; Ladislao et al., 2008; Stergiou et al., 2006), la regularidad de las señales biofisiológicas (Mäkikallio et al., 1998; Pincus, 1995; Rezek & Roberts, 1998) y, más recientemente, en acciones deportivas (Couceiro et al., 2013, 2014).

Con el tiempo, se detectaron ciertas limitaciones en la aplicación de la *ApEn*. En primer lugar, *ApEn* incluye inherentemente un sesgo hacia la regularidad, ya que contará una autocoincidencia de vectores. En segundo lugar, *ApEn* carece de consistencia relativa (Pincus, 1995), ya que, si los parámetros de entrada son cambiados, el valor de *ApEn* se puede transformar. En tercer lugar, los parámetros de *ApEn* deben fijarse y la comparación de datos solo debe realizarse cuando los parámetros de entrada son los mismos para ambos conjuntos de datos (Pincus, 1995). Esto es debido no solo a la cuestión de la coherencia relativa, sino también a la sensibilidad general del algoritmo a los parámetros elegidos y a la longitud de los datos (Lake et al., 2002; Richman & Moorman, 2000). Para subsanar estas deficiencias, Richman y Moorman (2000) formularon un nuevo algoritmo, la entropía muestral (*SampEn*).

### 5.3.1.2. Entropía muestral

La entropía muestral (*SampEn*) es un algoritmo similar a la *ApEn* (Pincus, 1995) que mide la regularidad de una señal. Es decir, calibra la presencia de patrones similares en una serie de tiempo. Dada una serie,  $Y(t)$ , de  $T$  puntos ( $t = 1, \dots, N$ ), *ApEn* y *SampEn* miden la probabilidad logarítmica de que dos secuencias similares de  $m$  puntos extraídos de  $Y(t)$ , sigan siendo similares (es decir, dentro de la tolerancia dada por  $r$ ) en la siguiente comparación incremental (es decir, para secuencias  $m + 1$ ) (Pincus, 1995; Richman & Moorman, 2000). *ApEn* y *SampEn* tienden a 0 por tiempo regular o serie periódica, mientras que, cuanto mayor sea la *SampEn* (o *ApEn*), los patrones son más impredecibles (Pincus, 1995; Richman & Moorman, 2000). La regularidad se relaciona con la complejidad del sistema que genera la señal (Pincus, 1995). Por tanto, una disminución de esta característica puede indicar una pérdida de complejidad del sistema.

La *SampEn* surge de la inconsistencia de la *ApEn* en el proceso de cálculo de su dependencia a la longitud de la serie. Cuantifica punto a punto las fluctuaciones del sistema de una serie temporal en una sola escala de tiempo, pero sobre una amplia gama de escalas de tiempo a través de un procedimiento de granulado grueso (un sistema físico con menor número de grados de libertad que los que hay realmente en el sistema) (Costa et al., 2005; Gow et al., 2015). Aunque la *SampEn* sugiere que es independiente a la longitud de los datos, demostrando coherencia relativa, se probó que, para series de datos menores a 100, la *SampEn* divergía en sus predicciones debido a la sensibilidad de sus algoritmos (Richman & Moorman, 2000). En general, la *SampEn* muestra un comportamiento más consistente que *ApEn* para diferentes elecciones de  $m$  y  $r$ , y es en gran medida independiente de la longitud del registro (Richman &

Moorman, 2000), lo que la convierte en una buena opción para su aplicación al contexto específico del deporte y del movimiento deportivo, en el que las series temporales suelen tener pocos datos.

A partir de la aparición de la *SampEn*, son muchos los estudios que la han utilizado como herramienta para analizar la regularidad de las series temporales (Borg & Laxaback, 2010; Donker et al., 2007; Hansen et al., 2017; Hauge et al., 2011; Huijben et al., 2018; Kaji et al., 2010; Masumura et al., 2008; Raffalt et al., 2019; Richman & Moorman, 2000; Roerdink et al., 2006; Santarcangelo et al., 2009; Stins et al., 2009; Suda et al., 2019).

### **5.3.1.3. Entropía multiescala**

Con el tiempo, se observó que con la *ApEn* y la *SampEn* no se podían medir todos los sucesos, ya que sus algoritmos están basados en una sola escala sin tener en cuenta que los sistemas fisiológicos tienen, de forma inherente, múltiples escalas temporales. La entropía multiescala aborda esta complejidad inherente a las señales biológicas, permitiendo tratar múltiples escalas espaciales y temporales en una serie de tiempo, reflejando las características multiescala de la operación del sistema biológico (Costa et al., 2002, 2005). De hecho, la entropía multiescala integra el método de entropía de muestra (*SampEn*), que cuantifica las fluctuaciones punto a punto de una serie de tiempo en una sola escala de tiempo (Costa et al., 2005; Gow et al., 2015). Las ventajas de este método radican en la información adicional que ofrecen sobre la relación entre los niveles de un sistema biológico, así como sobre la organización del movimiento del sujeto desde una perspectiva dinámica del sistema (Busa & van Emmerik, 2016).

La entropía multiescala ha sido utilizada en el análisis de señales biológicas (Costa et al., 2005; Thuraingham & Gottwald, 2006) como la frecuencia cardíaca (Costa et al., 2002, 2008; Norris et al., 2008), el control postural (Duarte & Sternad, 2008; Fino et al., 2016; Hansen et al., 2016), el análisis de la marcha (Costa et al., 2003; Liao et al., 2008) y en acciones musculares isométricas (Lin et al., 2014).

## **5.4. La variabilidad del movimiento en el deporte**

El estudio de la VM en el ámbito deportivo se realizó durante muchos años desde la óptica del análisis lineal. A partir de la aparición de los algoritmos de análisis no lineal (Pincus, 1991), pronto se empezaron a usar para analizar parámetros fisiológicos y, a medida que los instrumentos de medida han mejorado sus prestaciones, como ha sido la irrupción en el mercado

de los pequeños y ligeros dispositivos IMU con conexión *wireless*, se ha podido medir la VM en la marcha y la carrera (Caballero et al., 2019; Estep et al., 2018; Mehdizadeh et al., 2015; Preatoni, 2007; Preatoni et al., 2010), en golpes con implementos como el *putt* en el golf (Couceiro et al., 2013, 2014; Dias et al., 2014; Richardson et al., 2018), en el medio acuático (Seifert et al., 2014), en el saque de tenis (Couceiro et al., 2014), en deportes colectivos de contacto como el rugby (Moras et al., 2018), en las trayectorias de un jugador en un partido de fútbol (Couceiro et al., 2014), en el comportamiento táctico en el fútbol (Sampaio & Maças, 2012) y en la estabilidad dinámica y la predictibilidad de los jugadores de fútbol (Couceiro et al., 2014).

La literatura científica con respecto al análisis no lineal en los deportes no es muy extensa, siendo aún más reducida si buscamos estudios focalizados en el análisis de la VM de los movimientos específicos de cada deporte.

Por lo que se refiere al voleibol, son pocos los estudios que utilicen el análisis no lineal. Por un lado, podemos referenciar los estudios de Ana Ramos (Ramos, 2016; Ramos et al., 2017a, 2017b, 2020), en los que se analizan, a través de la entropía de Shannon, los índices de variabilidad táctica de las jugadoras en el complejo I (Ramos et al., 2017a), el condicionamiento que tiene el tipo de partido o el *ranking* del equipo en la variabilidad táctica de su complejo I (Ramos et al., 2017b), o de Marcelino et al. (2011) que, a través de la entropía aproximada evalúa la actuación del saque y el remate en los puntos iniciales y finales de un partido según la calidad del rival. Por otro lado, los estudios de Serrien (2016) analizan patrones de movimiento específicos del voleibol mediante técnicas de generalización no lineal, como los mapas de autoorganización (*Self-organizing Maps*) y el mapeo estadístico paramétrico (*Statistical Parametric Mapping*) en la acción de la CBR en el voleibol como única muestra. Sin embargo, cuando buscamos estudios que analicen la VM en movimientos específicos de cada deporte a través de análisis no lineal utilizando cálculos de entropía, tan solo encontramos cómo Santos et al. (2016), mediante un análisis de cuantificación de recurrencia cruzada (que incluye análisis con entropía de Shannon y entropía relativa), miden la variabilidad del toque de dedos con un balón de voleibol y con un globo, pero tan sólo miden la VM en la coordinación entre la flexión de los codos y las rodillas para realizar el movimiento, por lo que no evalúan la VM del gesto completo.

## Resumen del capítulo

La Teoría General de Sistemas Dinámicos considera a los seres vivos como seres complejos, dinámicos y abiertos. Esta consideración apunta a la necesidad de analizar la VM humano desde nuevas perspectivas. Un sistema complejo está compuesto de muchos elementos que interactúan entre sí, dando lugar a diferentes comportamientos observables (Urbán et al., 2015). Para comprender las características que delimitan los sistemas complejos debemos conocer los elementos que lo componen: Grados de libertad, concepto de no linealidad, parámetros de control y orden, histéresis, autoorganización, la estabilidad y los atractores en un sistema complejo. La VM desde diferentes perspectivas, ha servido para definir la salud de un sistema, para entenderla como un índice de la habilidad de adaptación del sistema, con la flexibilidad y la capacidad de adaptación ante entornos cambiantes. La VM humano se describe como el conjunto de variaciones habituales que se producen durante la ejecución de múltiples repeticiones de una misma tarea, habiéndose estudiado en el entorno deportivo en acciones técnicas concretas como el tiro libre en baloncesto, el saque en tenis, el *putt* en el golf y el lanzamiento de jabalina en el atletismo entre otros. La hipótesis sobre la que se ha sustentado históricamente el aprendizaje de habilidades motrices consiste en tratar de incrementar la eficacia y, por lo tanto, el rendimiento, mediante la reducción de la variabilidad mostrada por el aprendiz, a través de la práctica.

Diversos estudios que apoyan la hipótesis de que se produce una disminución continua de la VM en las diversas variables cinemáticas, mientras que al relacionar la VM con el nivel de habilidad se defiende la existencia de una relación en forma de U. Los deportistas noveles presentan una alta variabilidad y un bajo nivel de habilidad y los expertos que tienen un alto nivel de habilidad con una mayor VM que no deteriora su rendimiento motor. En el caso de medir la VM de forma global como resultante de los movimientos de las diferentes partes del cuerpo, tal y como se ha hecho en los estudios de esta tesis doctoral, cabe esperar una evolución de la VM en forma de L.

Con la aparición de los sistemas de análisis no lineal fue posible medir la variabilidad desde su estructura temporal y su complejidad. En este sentido algunos estudios evalúan la variabilidad inter-intentos y otros miden la variabilidad inter-individuos. Actualmente, disponemos de muchas herramientas para medir la VM a través de sistemas no lineales, como la entropía aproximada, la entropía muestral, la entropía multiescala, ...

Aunque la ApEn y la SampEn son medidas de la complejidad de un sistema, a la primera se le atribuyen dos deficiencias (Pincus, 1995). En primer lugar, la ApEn depende en gran medida de la longitud del registro y es uniformemente inferior a lo esperado para registros cortos. En segundo lugar, ApEn carece de consistencia relativa. En cambio, la SampEn se adapta razonablemente bien a conjuntos de datos mucho más cortos por lo que consideramos una de las opciones más razonables para calcular la VM de un movimiento como la CBR en voleibol.

## **6. JUSTIFICACIÓN DEL OBJETIVO GENERAL DE ESTA TESIS**



El remate en el voleibol es una acción esencial en el voleibol, siendo una de las acciones técnicas de mayor complejidad y dificultad, por lo que alcanzar un buen dominio de la técnica es determinante para conseguir una realización exitosa (Carrero, 1973; Chung, 1988; Cisar & Corbelli, 1989; Haley, 1992; Madden, 1997; Zhelezniak, 1993). Presenta una alta correlación con el resultado final de los partidos (Cox, 1974; Díaz, 1996; Eom, 1989; Häyrinen et al., 2004, 2000; Marelic et al., 1998; McCughton, 1998; Moutinho, 2001; Palao et al., 2004; Santos, 1992) por lo que diversos autores han estudiado los factores que pueden explicar cómo los deportistas alcanzan una mayor altura de golpeo y velocidad al golpear el balón (Bermejo et al., 2013; Coleman et al., 1993; Fuchs, Fusco, et al., 2019; Gutiérrez et al., 1992; Kumar & Kumar, 2020b). Dominar la acción del remate alcanzando la máxima altura al golpear del balón es importante, pero también lo es cuantificar las fuerzas de impacto que se producen en los aterrizajes aunque, sorprendentemente, pocos estudios se han focalizado en esta fase de la CBR (Lobiatti, 2020; Marquez et al., 2009; McNitt-Gray, 2000; Tillman et al., 2004). Por este motivo, en esta tesis decidimos medir la transmisión de las fuerzas de impacto hacia la zona lumbar en la fase de aterrizaje de la CBR realizada con y sin el condicionante del balón.

Por otro lado, también hemos considerado relevante analizar la VM de la CBR desde una visión no lineal a través de la entropía con el objetivo de analizar el comportamiento de esta variable en el entorno de un club de voleibol femenino de alto nivel.



## **7. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**



## **7.1. Objetivo General**

El objetivo general de esta tesis doctoral ha sido analizar las fuerzas de impacto en la zona lumbar y la VM en la ejecución de la CBR realizada por el lado derecho e izquierdo del campo y con y sin el condicionante del balón en jugadoras de voleibol de diferentes categorías y posiciones en el juego en un club de élite.

## **7.2. Objetivos e hipótesis de los estudios**

A continuación, se detallan el objetivo principal, los objetivos secundarios y las hipótesis de los tres estudios que conforman esta tesis doctoral.

### **Estudio 1**

Objetivo principal

Analizar la transmisión de las fuerzas de impacto a la zona lumbar durante la CBR con y sin el condicionante del balón en jugadoras de voleibol de diferentes categorías.

Objetivos secundarios

Analizar la transmisión de las fuerzas de impacto a la zona lumbar durante la CBR con y sin el condicionante del balón en jugadoras de voleibol de diferentes categorías.

Analizar el tiempo de vuelo y el intervalo de tiempo al realizar la CBR sin y con el condicionante del balón.

Hipótesis

H<sub>1</sub>: Las fuerzas de impacto en la CBR con el condicionante del balón serán superiores a las que se producen sin el condicionante del balón.

H<sub>2</sub>: El intervalo de tiempo al realizar la CBR sin el condicionante del balón será superior al de la CBR con el condicionante del balón.

H<sub>3</sub>: El tiempo de vuelo al realizar la CBR sin el condicionante del balón será superior al de la CBR con el condicionante del balón.

## **Estudio 2**

### Objetivo principal

Analizar la variabilidad de movimiento de la CBR realizada por los lados derecho e izquierdo del campo, con balón y sin el condicionante del balón.

### Hipótesis

H<sub>1</sub>: La variabilidad de movimiento de la CBR sin el condicionante del balón será similar por la parte derecha e izquierda del campo.

H<sub>2</sub>: La variabilidad de movimiento de la CBR con el condicionante del balón será más alta que sin el condicionante del balón.

H<sub>3</sub>: La variabilidad de movimiento de la CBR con el condicionante del balón será mayor por la parte derecha del campo.

## **Estudio 3**

### Objetivo principal

Analizar la variabilidad de la CBR entre las diferentes categorías del voleibol (*infantil, cadete, juvenil, sénior*) y entre los roles específicos del juego (*colocadora, punta, central, líbero*), en un club de élite.

### Hipótesis

H<sub>1</sub>: La variabilidad de la CBR con el condicionante del balón será más alta en las categorías inferiores, decreciendo de forma progresiva hasta la máxima categoría.

H<sub>2</sub>: La variabilidad de la CBR con el condicionante del balón será más baja en las jugadoras de posición punta.

## **8. ESTUDIOS**



## 8.1. Parte experimental

En la parte experimental de esta tesis se han realizado tres estudios en los que se analiza la CBR en jugadoras de voleibol de diferentes categorías pertenecientes a un club de élite.

En el estudio 1 se analizan las fuerzas de impacto a nivel de la zona lumbar en cada uno de los apoyos de la CBR, con y sin el condicionante del balón, en jugadoras de voleibol de diferentes categorías.

En el estudio 2 se analiza la variabilidad de la CBR realizada por los lados derecho e izquierdo del campo, con y sin el condicionante del balón.

En el estudio 3 se realiza un estudio transversal en el que se analiza la variabilidad de la CBR entre las diferentes categorías de las jugadoras y entre los roles específicos del juego.

Los estudios 1, 2 y 3 de esta tesis se realizaron con las mismas participantes, el mismo material y protocolo. A continuación (Tabla 7) mostramos un esquema sobre la metodología utilizada en la tesis.

Tabla 7. Esquema sobre la metodología empleada durante los estudios de la tesis.

Esquema Tesis			
	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3
Objetivo General	Analizar la transmisión de las fuerzas de impacto a la zona lumbar durante la CBR con y sin el condicionante del balón en jugadoras de voleibol de diferentes categorías.	Analizar la variabilidad de movimiento de la CBR realizada por los lados derecho e izquierdo del campo con y sin el condicionante del balón.	Analizar la variabilidad de la CBR entre las diferentes categorías del voleibol y entre los roles específicos del juego.
Diseño	Transversal	Transversal	Transversal
Muestra	48 jugadoras de élite de voleibol de diferentes categorías	48 jugadoras de élite de voleibol de diferentes categorías	48 jugadoras de élite de voleibol de diferentes categorías
Variable analizada	Fuerzas de Impacto en diferentes puntos de la CBR Tiempos de realización de las subfases de la CBR	Aceleración media SampEn	Aceleración media SampEn
Material	WIMU 1000Hz	WIMU 1000Hz	WIMU 1000Hz

### 8.1.1. Participantes

Los estudios 1, 2 y 3 contaron con una muestra de cuarenta y ocho jugadoras de voleibol de diferentes categorías, todas ellas en la máxima división nacional de su categoría. Todas las participantes firmaron el consentimiento informado (en el caso de las jugadoras menores de edad fue firmado por sus tutores legales).

De cada jugadora se tomaron diversos datos referentes a la práctica del voleibol. En primer lugar, la categoría a la que por edad le correspondía jugar. En nuestros estudios hemos categorizado a las jugadoras solo en 4 posiciones especializadas de juego: colocadora, punta, central y líbero. Descartamos la posición de opuesta ya que, al ser estudios de carácter transversal, las particularidades en los sistemas tácticos en las diferentes categorías y la filosofía de juego del club analizado, impedían encontrar jugadoras con un rol específico de opuesta, siendo todas las atacantes de ala catalogadas como *puntas*.

También se recabaron los datos referentes a los años de experiencia de práctica deportiva en el voleibol.

Además, se tomaron diversas medidas antropométricas:

La altura (m) y el peso (kg) fueron medidos en una báscula con tallímetro (IC6003), de pie contra una pared vertical, tocándolo con la espalda, glúteos y talones, y con la cabeza orientada en el plano de Frankfort, mientras el tallímetro tocaba el borde superior del cráneo sin presionar (Eston, 1996).

En la tabla 8 se muestran las características de las jugadoras del club, desglosadas por categorías.

Además, fue consultada a las jugadoras, y comprobada posteriormente durante la realización del estudio, la extremidad superior con la que realizaban el golpeo de remate.

Tabla 8. Valores de las jugadoras por categorías expresados en media.

<b>Categoría</b>	<b>n</b>	<b>Edad (años)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Experiencia (años)</b>
Infantil	12	13,83 ± 0,39	1,73 ± 0,05	57,18 ± 5,74	4,33 ± 0,98
Cadete	12	15,67 ± 0,49	1,77 ± 0,04	65,06 ± 3,69	6,08 ± 1,24
Juvenil	12	18,08 ± 0,79	1,79 ± 0,05	69,90 ± 6,40	8,58 ± 2,39
Sénior	12	22,67 ± 2,53	1,81 ± 0,05	73,99 ± 6,15	12,92 ± 3,42
Global	48	17,56 ± 3,60	1,77 ± 0,05	66,53 ± 7,09	7,98 ± 3,91

n = número de jugadoras.

Los criterios de exclusión fueron: tener alguna lesión que le impidiese saltar o golpear el balón, o bien tener menos de 3 años de experiencia como jugadora de voleibol. En cuanto a la posición específica en el campo se requería que al menos tuviesen 2 años de experiencia en esa posición. Los estudios de esta tesis tenían como objetivo analizar la evolución de la CBR una vez superada la etapa inicial del aprendizaje.

Todas las jugadoras participantes en los estudios de esta tesis tenían un mínimo de 3 sesiones de entrenamiento a la semana de, al menos, dos horas de duración. Los procedimientos cumplieron con la Declaración de Helsinki (2013) y fueron aprobados por el comité de ética local (03/2015/ CEICEGC).

## 8.1.2. Material

Los tres estudios de esta tesis fueron realizados en una pista de voleibol con medidas oficiales homologada para participar en competiciones nacionales, un juego de palos y una red homologada por la RFEVB, 12 pelotas Molten V5M5000 y un carro de pelotas (Figura 14).



Figura 14. Imagen del balón de voleibol Molten V5M5000 utilizado en los estudios.

Las medidas antropométricas de la altura y el peso fueron medidas con una báscula con tallímetro IC6003 (Figura 15).



Figura 15. Báscula con tallímetro IC6003.

Para sincronizar las imágenes con las fases del movimiento de la CBR y poder identificarlas visualmente, se utilizó una cámara portátil de alta velocidad (Casio Exilim EXZR100) (Figura 16), sobre un trípode Hama Star 63 166-3D, grabando a 210 fps. Se descartaron velocidades superiores por la baja intensidad de la luz del pabellón.



Figura 16. Cámara portátil de alta velocidad Casio Exilim EXZR100.

La aceleración y las fuerzas de impacto de las jugadoras de voleibol se midieron utilizando una unidad de medida inercial (WIMU, Realtrack Systems, Almería, España), con capacidad de procesamiento de 16 Hz, que consta, entre otros sensores, de un acelerómetro 3D de 100G a

1000 Hz (Figura 17a). El dispositivo se colocó cerca de la L5, utilizando un cinturón rígido especialmente diseñado para los estudios (Figura 17b).



a

b

Figura 17. Dispositivo WIMU y el cinturón diseñado para los estudios.

### 8.1.3. Protocolo

Cada jugadora realizó dos sesiones en las que se tomaron datos correspondientes a la CBR con y sin el condicionante del balón. Dos semanas antes de iniciar el estudio se hizo una reunión informativa para todos los padres y madres.

En la primera sesión, las jugadoras firmaron el consentimiento informado. En el caso de las jugadoras menores de edad, los padres, madres o el tutor legal firmaron con antelación el consentimiento informado.

A continuación, se procedió a tomar los datos personales y antropométricos de las jugadoras.

El calentamiento tuvo una duración de 8 minutos. En los tres primeros minutos se realizaron desplazamientos en todo el ancho de 9 metros del campo de voleibol: un minuto de desplazamiento lineal anteroposterior, un minuto de desplazamiento lineal anteroposterior con cambios de dirección lateral hacia la derecha y hacia la izquierda, y un minuto de desplazamiento lineal anteroposterior con cambios de dirección y cambios de ritmo de menor a mayor velocidad.

Durante los dos minutos siguientes se realizaron ejercicios de movilidad articular de todas las articulaciones de forma ascendente: tobillos, rodillas, cadera, cintura escapular, hombros, codos, muñecas y cuello.

Los tres minutos finales de calentamiento fueron con balón y consistieron en golpear el balón cerca de la pared, sin salto, con el brazo dominante. En el transcurso de los tres minutos, la intensidad del golpeo se fue incrementando. El calentamiento finalizaba con una serie de 4 CBR en la red, por los lados derecho e izquierdo del campo (zona II y IV del campo respectivamente).

Después del calentamiento, la jugadora se colocaba un cinturón rígido especialmente preparado para llevar el dispositivo WIMU (Figura 17b). El diseño del cinturón y del compartimento para el WIMU fue pensado para que el dispositivo quedara totalmente pegado al cuerpo, evitando movimientos y oscilaciones no deseadas (Elvin et al., 2007; Montgomery et al., 2010; Picerno et al., 2011). El dispositivo quedaba situado en la parte lumbar del sujeto, cerca del centro de masas del cuerpo, en la L5 (Elvin et al., 2007). Para que el cinturón estuviese ajustado al cuerpo se utilizaron dos tallas diferentes, seleccionándose el más adecuado para cada jugadora. El cinturón, en ningún caso, limitaba o entorpecía los movimientos de las jugadoras durante la realización de la CBR.

Todas las sesiones fueron grabadas con una cámara de alta velocidad. La cámara se situó sobre un trípode, orientando perpendicularmente su eje focal hacia la trayectoria de la CBR. La cámara se colocó en el lado contrario del brazo de golpeo de la jugadora (Figuras 18 y 19).

Para facilitar la sincronización posterior de la señal de aceleración con el vídeo, antes de empezar cada bloque, y al finalizar el mismo, se golpeaba el WIMU con la mano, delante de la videocámara, para generar un pico de aceleración que fuera fácilmente reconocible en la señal de aceleración, lo que permitía la sincronización posterior con el inicio y final del vídeo.

A continuación, la jugadora realizaba, en orden aleatorio, las series de remate de cada bloque con la red a la altura reglamentaria, en función de su categoría.

- Bloque 1: 2 series de 6 saltos de remate por zona IV (zona izquierda del campo) sin balón.
- Bloque 2: 2 series de 6 saltos de remate por zona II (zona derecha del campo) sin balón.
- Bloque 3: 2 series de 6 saltos de remate por zona IV (zona izquierda del campo) con balón.
- Bloque 4: 2 series de 6 saltos de remate por zona II (zona derecha del campo) con balón.

Después de cada serie de seis remates había una pausa de 10 s y, entre bloques, una pausa de 3 minutos, para limitar los efectos de la fatiga en la capacidad de salto.

En los bloques de remate realizados con balón (Bloques 3 y 4), el colocador realizaba la colocación a una pelota lanzada por él mismo (Figura 19). Solamente se registraron los remates en los que la colocación permitía golpear de forma cómoda y siempre que el balón contactase dentro de los límites del campo contrario. Los dos bloques realizados con balón fueron llevados a cabo por un colocador experimentado. La colocación se realizó desde el punto central de la red hacia las varillas, con una trayectoria alta de tercer tiempo (al menos 2 metros por encima del borde superior de la red en el punto más alto de la trayectoria).

Cada jugadora realizó un total de 48 saltos válidos, divididos en dos sesiones. En cada una de las sesiones, cada jugadora realizó 24 CBR, 4 series de 6 CBR cada una, realizadas con balón o sin balón de forma aleatoria. Durante la realización de los remates no se dio ninguna consigna ni instrucción a las jugadoras. En caso de que el remate no superase la red o no entrara en el campo contrario se repetiría la acción hasta completar cada serie con 6 registros.

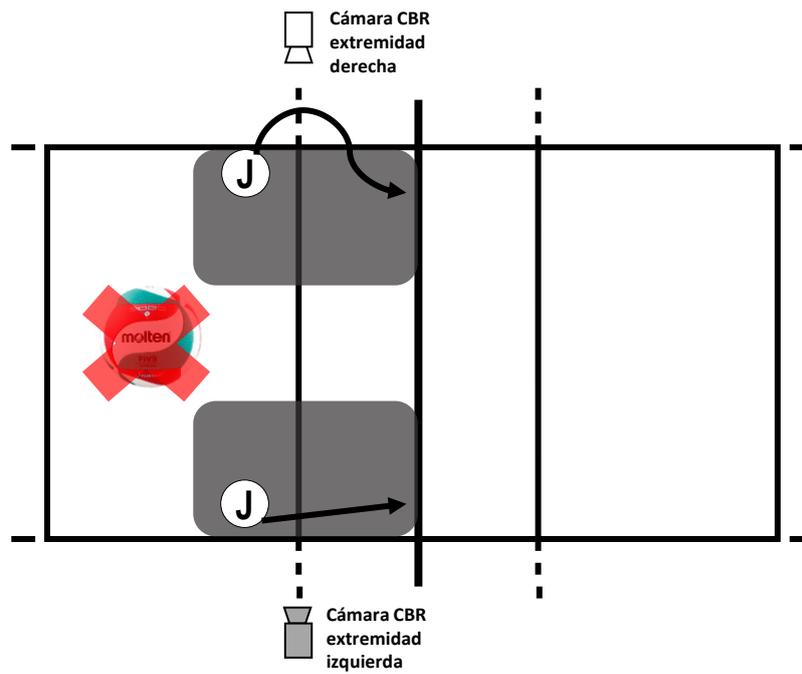


Figura 18. Diseño de los estudios para CBR sin balón, colocación de las cámaras y situación de la deportista por zona II y zona IV.

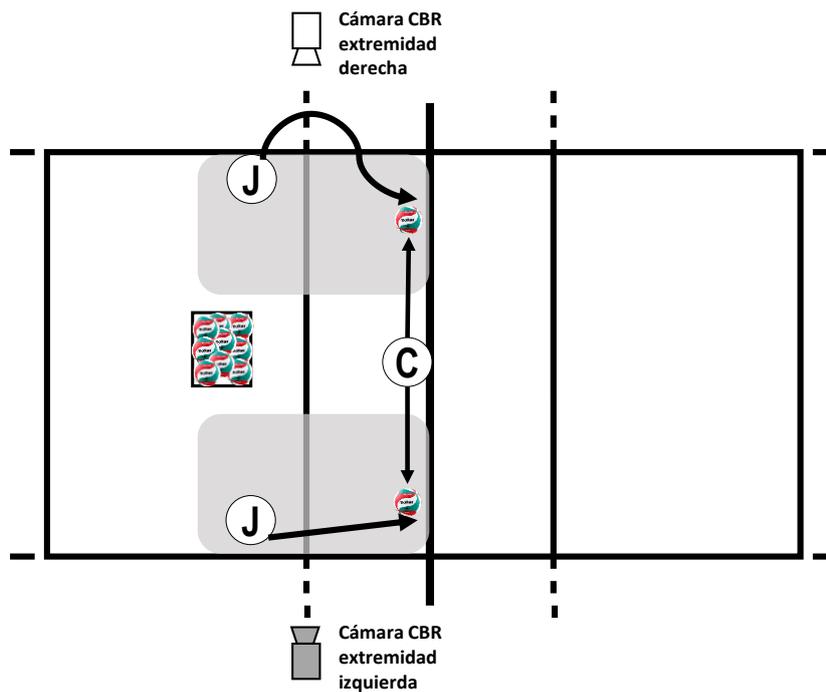


Figura 19. Diseño de los estudios para la CBR con balón, colocación de las cámaras y situación de la deportista por zona II y zona IV.

**8.2. Estudio 1: Transmisión de las fuerzas de impacto a la zona lumbar durante la carrera batida de remate con y sin el condicionante del balón en jugadoras de voleibol de diferentes categorías**



## **Objetivo principal**

Analizar la transmisión de las fuerzas de impacto a la zona lumbar durante la CBR con y sin el condicionante del balón en jugadoras de voleibol de diferentes categorías.

## **Objetivos secundarios**

Analizar el tiempo de vuelo y el intervalo de tiempo al realizar la CBR sin y con el condicionante del balón.

## **Hipótesis**

H<sub>1</sub>: Las fuerzas de impacto en la CBR con el condicionante del balón serán superiores a las que se producen sin el condicionante del balón.

H<sub>2</sub>: El intervalo de tiempo al realizar la CBR sin el condicionante del balón será superior al de la CBR con el condicionante del balón.

H<sub>3</sub>: El tiempo de vuelo al realizar la CBR sin el condicionante del balón será superior al de la CBR con el condicionante del balón.

## **Análisis de los datos**

Para el análisis de los datos se empleó, primeramente, el *software* específico del WIMU (Spro WIMU, Realtrack Systems, Almería, España), con el que se realizó un primer análisis visual de la señal para comprobar la nitidez, se aplicaron cortes por cada repetición de la CBR y se identificaron los puntos de impacto de la CBR:  $a1$  = paso de orientación;  $a2$  = impulso de frenado;  $a3$  = impulso de aceleración;  $a4$  = golpeo del balón;  $a5$  = aterrizaje. La aceleración se midió mediante el módulo (Ecuación 2) medido en g. De los mismos cortes se sacaron los intervalos de tiempo de la CBR:  $t1-2$  = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado;  $t2-3$  = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración;  $tvuelo$  = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje y  $t_{CBR}$ =tiempo total del movimiento, medido en milisegundos (ms). Posteriormente, estos datos fueron exportados al *software* Excel, donde se calcularon las medias por deportista y por cada bloque de repeticiones.

## **Análisis estadístico**

Para comparar las diferentes fases de la CBR con y sin balón se ha implementado un Modelo Lineal Mixto para cada una de las fases, siendo la variable *condición* (sin balón y con balón) la variable explicativa principal. Para cada jugadora se dispone de dos series de 6 repeticiones para cada condición. Así, para cada jugadora se tienen un total de 48 repeticiones. La variable *jugadora* se ha introducido como un factor aleatorio para controlar la variabilidad de la jugadora. También se introduce la interacción *jugadora por condición* (Jugadora\*Condición) como efecto aleatorio, a fin de controlar la variabilidad individual de la jugadora por condición.

Los modelos se han obtenido de forma global y diferenciando por categoría de jugadora (*infantil, cadete, juvenil y sénior*).

Los análisis estadísticos se han llevado a cabo con el *software* IBM® SPSS® Statistics v25. Las decisiones estadísticas se han realizado tomando como nivel de significación el valor  $p < 0,05$ .

## **Resultados**

En la tabla 9 observamos los resultados de todas las fases de la CBR sin balón por categorías.

Tabla 9. Valores medios  $\pm$  desviación estándar de todas las variables de la CBR sin balón (SB) para las diferentes categorías.

Las aceleraciones medidas en g, y los tiempos de las fases medidos en milisegundos (ms). El valor de a4 no existe en la CBR sin balón ya que en ella no hay impacto con el balón.

Sin Balón	Infantil	Cadete	Juvenil	Sénior	Global
n	12	12	12	12	48
a1 (g)	2,28 $\pm$ 0,60	1,93 $\pm$ 0,59	2,37 $\pm$ 0,65	2,35 $\pm$ 0,86	2,23 $\pm$ 0,71
t1-2 (ms)	441,54 $\pm$ 77,35	462,47 $\pm$ 65,48	402,16 $\pm$ 81,61	421,54 $\pm$ 68,49	431,93 $\pm$ 76,79
a2 (g)	5,73 $\pm$ 2,13	5,45 $\pm$ 2,27	5,06 $\pm$ 2,33	4,37 $\pm$ 1,59	5,15 $\pm$ 2,16
t2-3 (ms)	255,27 $\pm$ 49,93	272,57 $\pm$ 44,32	238,67 $\pm$ 55,24	235,29 $\pm$ 26,56	250,45 $\pm$ 47,63
a3 (g)	5,67 $\pm$ 1,94	5,83 $\pm$ 1,48	6,08 $\pm$ 1,90	5,96 $\pm$ 1,89	5,77 $\pm$ 1,83
a4 (g)					
tvuelo (ms)	611,99 $\pm$ 51,76	682,53 $\pm$ 52,42	685,1 $\pm$ 54,99	696,89 $\pm$ 43,30	669,12 $\pm$ 60,77
a5 (g)	10,43 $\pm$ 3,76	11,34 $\pm$ 7,22	12,99 $\pm$ 4,15	11,28 $\pm$ 5,12	11,51 $\pm$ 5,31
tCBR (ms)	1308,79 $\pm$ 101,31	1417,56 $\pm$ 87,01	1325,89 $\pm$ 107,29	1353,73 $\pm$ 86,02	1351,49 $\pm$ 104,29

CBR= Carrera batida de remate; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje; t1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = tiempo total del movimiento

En la tabla 10 observamos los resultados de todas las fases de la CBR con balón por categorías.

Tabla 10. Valores medios  $\pm$  desviación estándar de todas las variables de la CBR con balón (CB) para las diferentes categorías.

Las aceleraciones medidas en g y los tiempos de las fases medidos en milisegundos (ms).

Con Balón	Infantil	Cadete	Juvenil	Sénior	Global
n	12	12	12	12	48
a1 (g)	2,30 $\pm$ 0,67	2,44 $\pm$ 0,76	2,55 $\pm$ 0,94	2,38 $\pm$ 0,82	2,42 $\pm$ 0,81
t1-2 (ms)	382,03 $\pm$ 94,11	380,26 $\pm$ 93,80	371,26 $\pm$ 103,55	380,52 $\pm$ 85,16	378,52 $\pm$ 94,35
a2 (g)	3,69 $\pm$ 1,44	3,33 $\pm$ 1,46	3,75 $\pm$ 2,02	3,08 $\pm$ 1,17	3,46 $\pm$ 1,58
t2-3 (ms)	254,25 $\pm$ 52,78	257,72 $\pm$ 39,42	238,96 $\pm$ 51,81	246,91 $\pm$ 56,59	249,46 $\pm$ 51,01
a3 (g)	5,46 $\pm$ 0,93	6,31 $\pm$ 2,10	6,36 $\pm$ 1,75	5,84 $\pm$ 1,66	5,99 $\pm$ 1,81
a4 (g)	2,74 $\pm$ 0,93	3,22 $\pm$ 1,17	3,31 $\pm$ 1,27	3,57 $\pm$ 1,13	3,21 $\pm$ 1,17
tvuelo (ms)	591,30 $\pm$ 48,52	671,47 $\pm$ 46,59	651,35 $\pm$ 51,48	669,36 $\pm$ 54,72	645,87 $\pm$ 59,92
a5 (g)	11,16 $\pm$ 4,17	12,97 $\pm$ 5,82	13,26 $\pm$ 4,87	14,39 $\pm$ 5,18	12,94 $\pm$ 5,17
tCBR (ms)	1227,58 $\pm$ 98,31	1309,44 $\pm$ 119,45	1261,56 $\pm$ 119,28	1296,79 $\pm$ 116,40	1273,84 $\pm$ 117,97

CBR= Carrera batida de remate; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón, a5 = aterrizaje; t1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = tiempo total del movimiento

Resultados de los porcentajes de incremento de cada fase de la CBR, en la categoría global entre CBR sin balón y con balón (Tabla 11).

Tabla 11. Valores medios  $\pm$  su desviación estándar de las fases de la CBR con balón (CB) y sin balón (SB) en el global y sus porcentajes de incremento.

<b>Fases de la CBR</b>	<b>Media <math>\pm</math> DE</b>	<b>Aumento (%)</b>
SB a1 (g)	2,23 $\pm$ 0,71	
CB a1 (g)	2,42 $\pm$ 0,81	8,47
SB t1-2 (ms)	431,93 $\pm$ 76,79	
CB t1-2 (ms)	378,52 $\pm$ 94,35	-12,37
SB a2 (g)	5,15 $\pm$ 2,16	
CB a2 (g)	3,46 $\pm$ 1,58	-32,82
SB t2-3 (ms)	250,45 $\pm$ 47,63	
CB t2-3 (ms)	249,46 $\pm$ 51,01	-0,40
SB a3 (g)	5,77 $\pm$ 1,83	
CB a3 (g)	5,99 $\pm$ 1,81	3,81
SB a4 (g)	-	
CB a4 (g)	3,21 $\pm$ 1,17	-
SB tvuelo (ms)	669,12 $\pm$ 60,77	
CB tvuelo (ms)	645,87 $\pm$ 59,92	-3,47
SB a5 (g)	11,51 $\pm$ 5,31	
CB a5 (g)	12,94 $\pm$ 5,17	12,43
SB tCBR (ms)	1351,49 $\pm$ 104,29	
CB tCBR (ms)	1274,77 $\pm$ 115,69	-5,68

CBR= Carrera batida de remate; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje; t1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = tiempo total del movimiento

Las diferencias entre la CBR con y sin balón, en el global, se muestran en la tabla 12.

Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada impacto medido en la CBR, comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

Tabla 12. Resultado de la significación de la variable balón (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases.

<b>Fases de la CBR</b>	<b>Media <math>\pm</math> DE</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
a1			
Sin balón	2,23 $\pm$ 0,52	4,438	0,0410
Con balón	2,42 $\pm$ 0,54		
a2			
Sin balón	5,15 $\pm$ 1,85	75,101	< 0,001
Con balón	3,46 $\pm$ 1,22		
a3			
Sin balón	5,77 $\pm$ 1,51	1,522	0,223
Con balón	5,99 $\pm$ 1,29		
a4			
Sin balón			
Con balón	3,21 $\pm$ 0,80	-	-
a5			
Sin balón	11,51 $\pm$ 4,43	5,287	0,026
Con balón	12,94 $\pm$ 3,83		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje.

No se muestran resultados para a4 sin balón puesto que no existe golpeo del balón.

Se observa que, en la comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en el global de jugadoras, se obtuvieron diferencias significativas en *a1* ( $p = 0,041$ ), en *a2* ( $p < 0,001$ ) y en *a5* ( $p = 0,026$ ) (Figura 20).

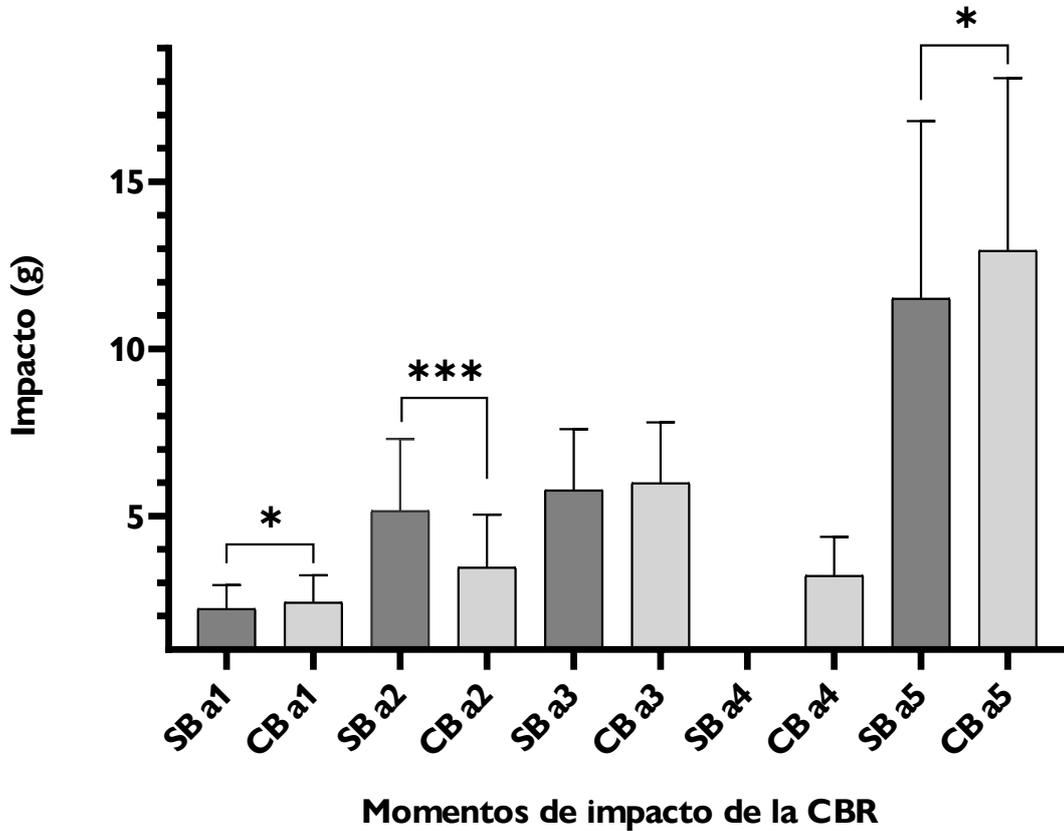


Figura 20. Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en el global de jugadoras. La altura de las barras corresponde a la media de la variable más una desviación estándar. Las diferencias de significación mostradas son \*  $p < 0,05$  y \*\*\*  $p < 0,001$ . CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje.

En la tabla 13 se presentan la media y la DE, así como el valor del estadístico *F* y el valor *p* de la relación entre la CBR sin balón (SB) y con balón (CB), para cada fase de tiempo medido de la CBR (*t1-2*, *t2-3*, *tvuelo*, *tCBR*).

Tabla 13. Resultado de la significación de la variable balón (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada fase de tiempo medido en la CBR comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

<b>Fases de la CBR</b>	<b>Media ± DE</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<b>t1-2</b>			
Sin balón	431,93 ± 51,02	33,61	< 0,001
Con balón	378,52 ± 59,47		
<b>t2-3</b>			
Sin balón	250,45 ± 39,58	0,038	0,846
Con balón	249,46 ± 38,13		
<b>tvuelo</b>			
Sin balón	669,12 ± 52,90	31,64	< 0,001
Con balón	645,87 ± 48,58		
<b>tCBR</b>			
Sin balón	1351,49 ± 83,92	62,88	< 0,001
Con balón	1274,77 ± 81,15		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar; t1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = tiempo total del movimiento.

Observamos que, en la comparación entre las fases de tiempo de la CBR SB y CB en el global de jugadoras, se obtuvieron diferencias significativas en  $t1-2$  ( $p < 0,001$ ), en *tvuelo* ( $p < 0,001$ ) y en  $tCBR$  ( $p < 0,001$ ) (Figura 21).

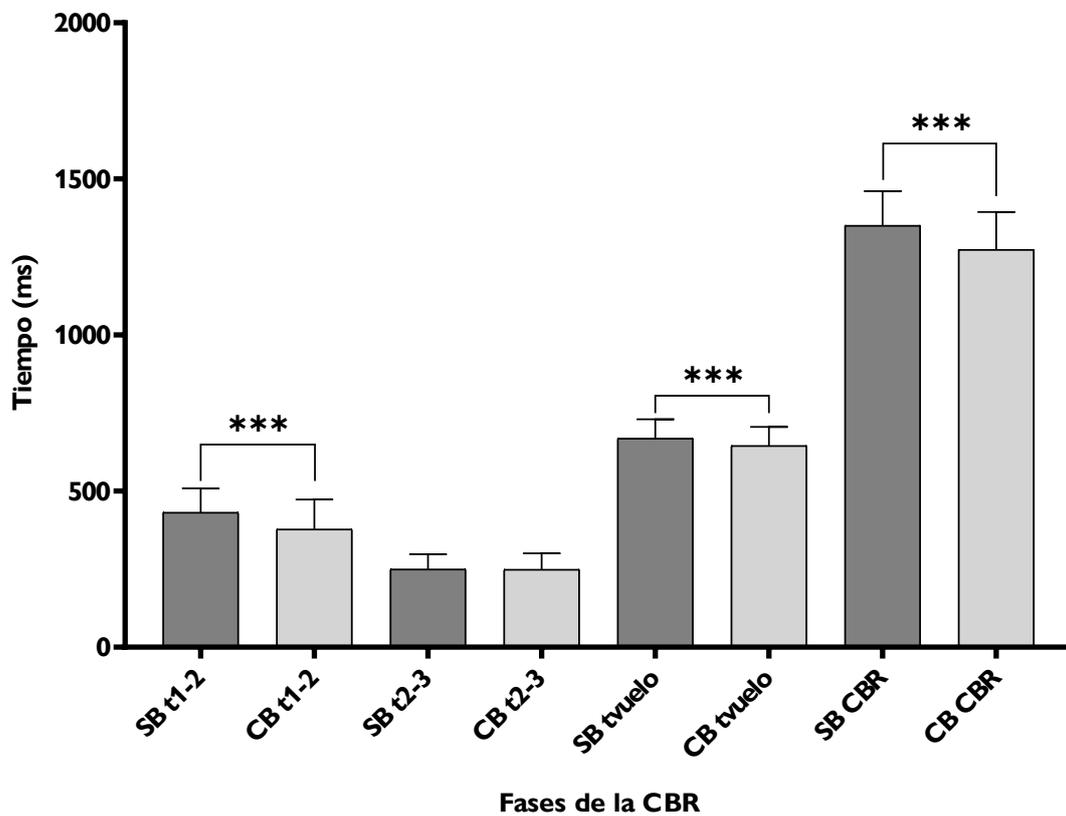


Figura 21. Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB en el global de las jugadoras. Las diferencias de significación mostradas son \*\*\*  $p < 0,001$ . CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón;  $t1-2$  = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado;  $t2-3$  = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; *tvuelo* = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje;  $tCBR$  = tiempo total del movimiento.

### Diferencias entre las fuerzas de impacto producidas en la CBR sin y con balón por categorías

Para la categoría *infantil*, se presenta en la tabla 14 la media y la DE, así como el valor del estadístico  $F$  y el valor  $p$  de la relación entre la CBR sin balón (SB) y con balón (CB), para cada impacto evaluado de la CBR ( $a1, a2, a3, a4, a5$ ) de las jugadoras.

### Categoría infantil

Tabla 14. Resultado de la significación de la variable balón (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada apoyo medido en la CBR, comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

Fases de la CBR	Media $\pm$ DE	Valor F	Valor p
a1			
Sin balón	2,27 $\pm$ 0,33	0,0630	0,806
Con balón	2,30 $\pm$ 0,31		
a2			
Sin balón	5,73 $\pm$ 1,71	27,080	< 0,001
Con balón	3,69 $\pm$ 0,83		
a3			
Sin balón	5,67 $\pm$ 1,72	0,248	0,628
Con balón	5,46 $\pm$ 0,90		
a4			
Sin balón		-	-
Con balón	2,74 $\pm$ 0,54		
a5			
Sin balón	10,43 $\pm$ 1,92	0,922	0,357
Con balón	11,16 $\pm$ 2,23		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje.

Se observa que, en la comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en las jugadoras infantiles, se obtuvieron diferencias significativas en  $a_2$  ( $p < 0,001$ ) (Figura 22). En la CBR SB no encontramos valores de  $a_4$ , ya que en ella no existe golpeo del balón.

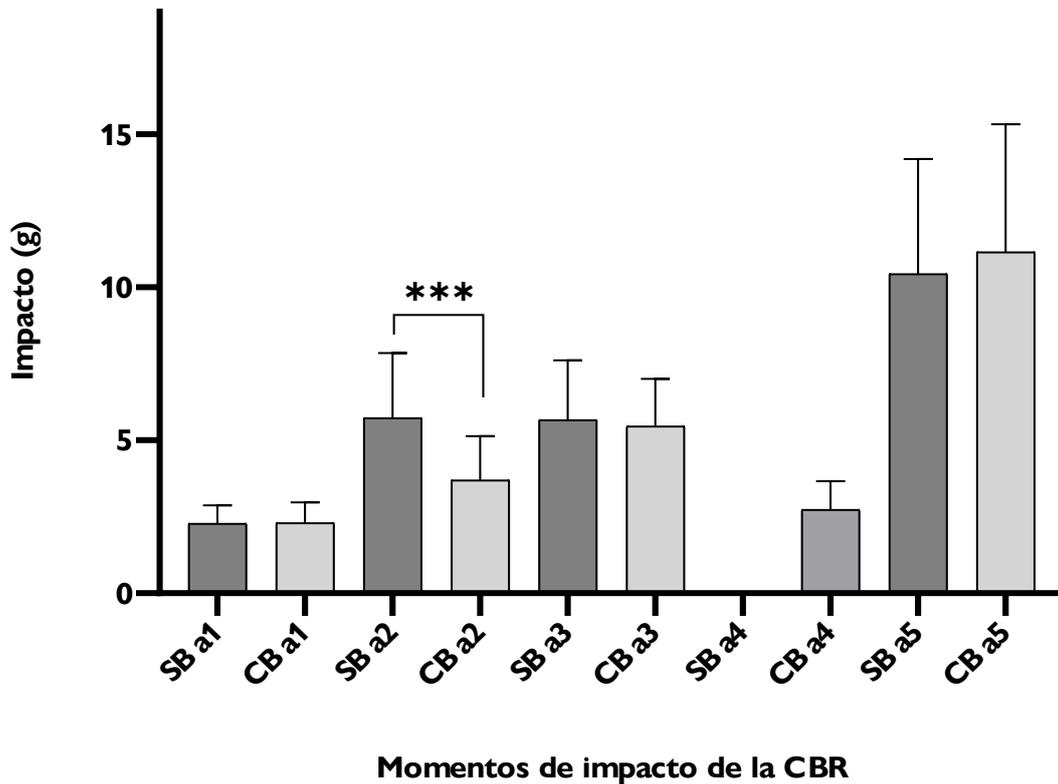


Figura 22. Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB de la categoría *infantil*. Las diferencias de significación mostradas son \*\*\*  $p < 0,001$ . CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón;  $a_1$  = paso de orientación;  $a_2$  = impulso de frenado;  $a_3$  = impulso de aceleración,  $a_4$  = golpeo del balón;  $a_5$  = aterrizaje.

### Categoría cadete

Tabla 15. Resultado de la significación de la variable *balón* (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada apoyo medido en la CBR, comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

Fases de la CBR	Media $\pm$ DE	Valor F	Valor p
a1			
Sin balón	1,93 $\pm$ 0,42	11,06	0,007
Con balón	2,44 $\pm$ 0,48		
a2			
Sin balón	5,45 $\pm$ 2,13	16,65	0,002
Con balón	3,33 $\pm$ 1,14		
a3			
Sin balón	5,38 $\pm$ 1,20	13,19	0,004
Con balón	6,31 $\pm$ 1,63		
a4			
Sin balón			
Con balón	3,22 $\pm$ 0,87	-	-
a5			
Sin balón	11,34 $\pm$ 6,75	1,12	0,313
Con balón	12,97 $\pm$ 4,68		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje.

Observamos que, en la comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en las jugadoras cadetes, se obtuvieron diferencias significativas en  $a1$  ( $p = 0,007$ ), en  $a2$  ( $p = 0,002$ ) y en  $a3$  ( $p = 0,004$ ) (Figura 23). En la CBR SB no encontramos valores de  $a4$ , ya que en ella no existe golpeo del balón.

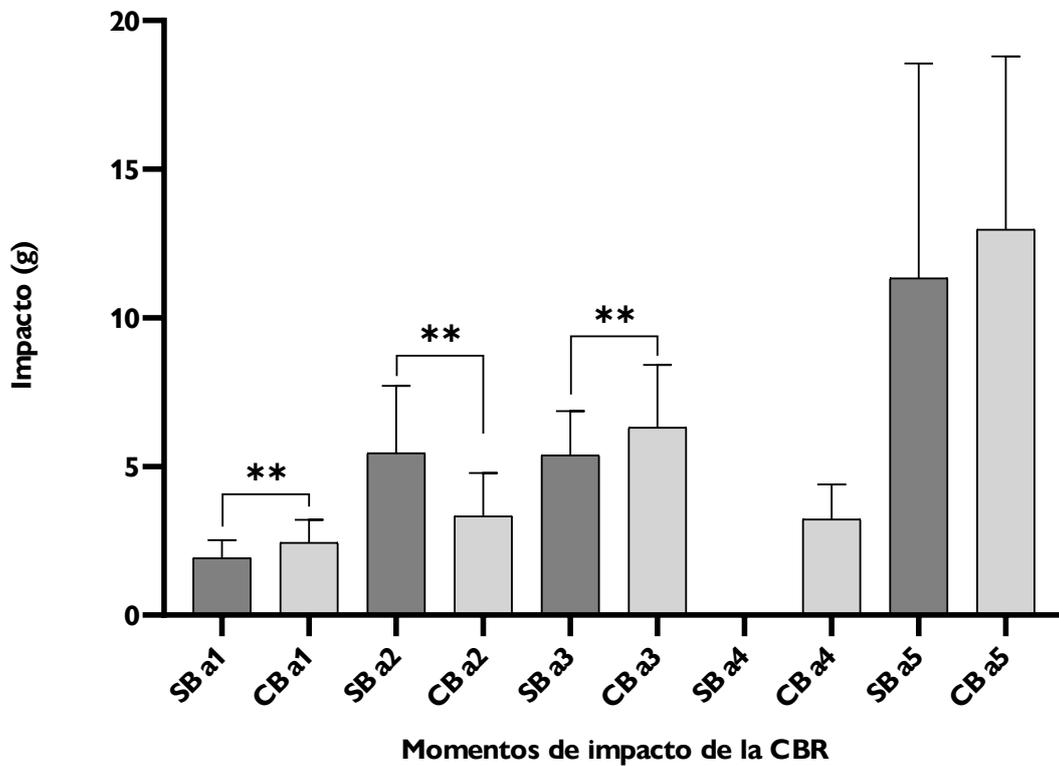


Figura 23. Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB de la categoría *cadete*. Las diferencias de significación mostradas son \*\*  $p < 0,01$ . CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje.

## Categoría juvenil

Tabla 16. Resultado de la significación de la variable balón (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada apoyo medido en la CBR, comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

Fases de la CBR	Media $\pm$ DE	Valor F	Valor p
a1			
Sin balón	2,37 $\pm$ 0,49	0,585	0,460
Con balón	2,55 $\pm$ 0,82		
a2			
Sin balón	5,06 $\pm$ 2,07	19,070	0,001
Con balón	3,75 $\pm$ 1,81		
a3			
Sin balón	6,09 $\pm$ 1,42	0,908	0,361
Con balón	6,36 $\pm$ 1,15		
a4			
Sin balón		-	-
Con balón	3,31 $\pm$ 0,87		
a5			
Sin balón	13,00 $\pm$ 2,93	0,0350	0,853
Con balón	13,26 $\pm$ 3,87		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje.

Observamos que, en la comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en las jugadoras juveniles, se obtuvieron diferencias significativas en a2 ( $p = 0,001$ ) (Figura 24). En la CBR SB no encontramos valores de a4, ya que en ella no existe golpeo del balón.

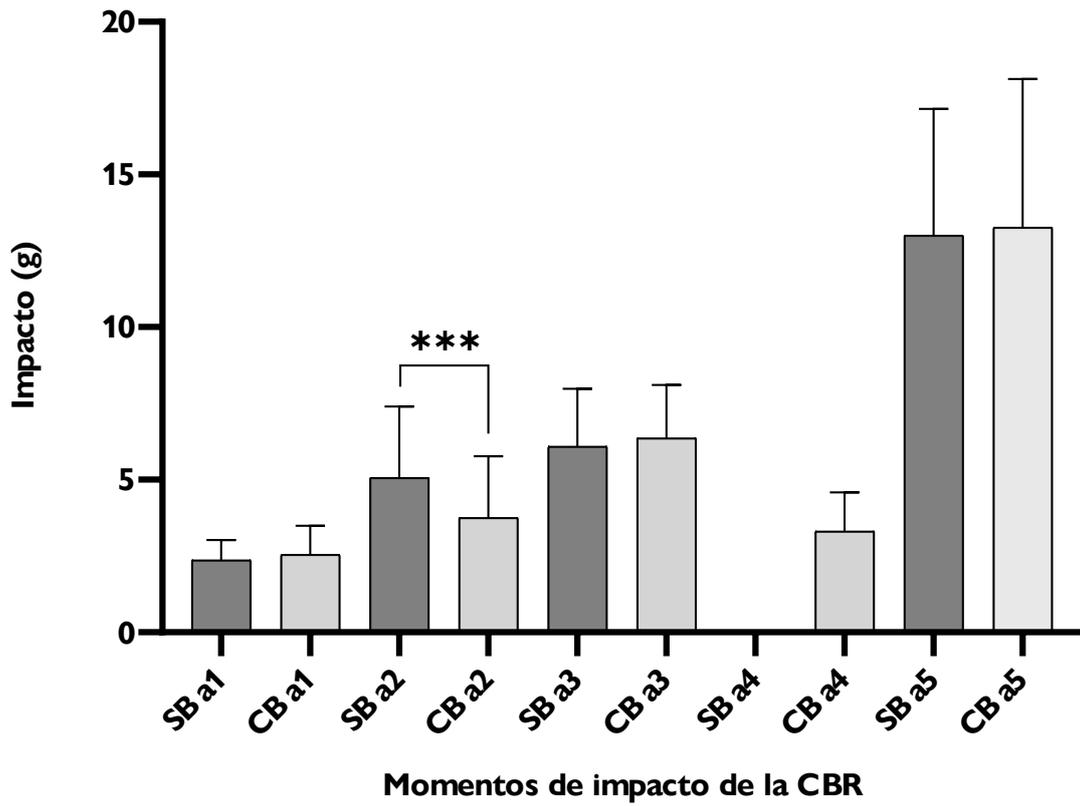


Figura 24. Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB de la categoría *juvenil*. Las diferencias de significación mostradas son \*\*\*  $p < 0,001$ . CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje.

## Categoría sénior

Tabla 17. Resultado de la significación de la variable *balón* (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada apoyo medido en la CBR, comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

Fases de la CBR	Media $\pm$ DE	Valor F	Valor p
<i>a1</i>			
Sin balón	2,35 $\pm$ 0,70	0,0350	0,855
Con balón	2,38 $\pm$ 0,50		
<i>a2</i>			
Sin balón	4,37 $\pm$ 1,32	20,400	< 0,001
Con balón	3,08 $\pm$ 0,85		
<i>a3</i>			
Sin balón	5,96 $\pm$ 1,74	0,0920	0,768
Con balón	5,84 $\pm$ 1,30		
<i>a4</i>			
Sin balón		-	-
Con balón	3,57 $\pm$ 0,72		
<i>a5</i>			
Sin balón	11,28 $\pm$ 4,72	9,436	0,011
Con balón	14,39 $\pm$ 3,86		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar; *a1* = paso de orientación; *a2* = impulso de frenado; *a3* = impulso de aceleración; *a4* = golpeo del balón; *a5* = aterrizaje.

Observamos que, en la comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en las jugadoras sénior se obtuvieron diferencias significativas en *a2* ( $p = < 0,001$ ) y en *a5* ( $p = 0,011$ ) (Figura 25). En la CBR SB no encontramos valores de *a4*, ya que en ella no existe golpeo del balón.

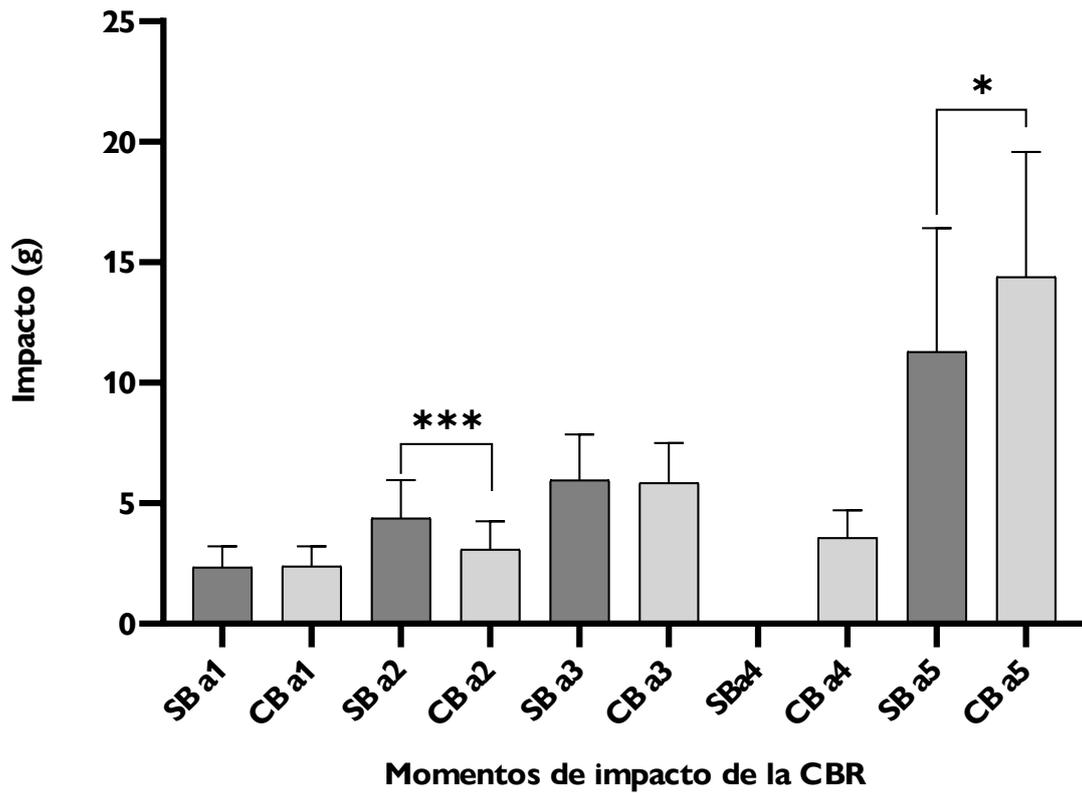


Figura 25. Comparación entre los impactos resultantes en las fases de la CBR SB y CB de la categoría sénior. Las diferencias de significación mostradas son \*  $p < 0,05$ , y \*\*\*  $p < 0,001$ . CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón; a1 = paso de orientación; a2 = impulso de frenado; a3 = impulso de aceleración; a4 = golpeo del balón; a5 = aterrizaje.

### Diferencias entre los tiempos de la CBR sin y con balón por categorías

#### Categoría infantil

En la tabla 18 se presentan la media y la DE, así como el valor del estadístico  $F$  y el valor  $p$  de la relación entre la CBR sin balón (SB) y con balón (CB), para cada fase de tiempo medido en la CBR ( $t1-2$ ,  $t2-3$ ,  $tvuelo$ ,  $tCBR$ ).

Tabla 18. Resultado de la significación de la variable *balón* (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada fase de tiempo medido en la CBR, comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

Fases de la CBR	Media $\pm$ DE	Valor F	Valor p
t1-2			
Sin balón	441,54 $\pm$ 52,13	8,520	0,014
Con balón	382,03 $\pm$ 60,06		
t2-3			
Sin balón	255,27 $\pm$ 41,47	0,009	0,927
Con balón	254,25 $\pm$ 34,51		
tvuelo			
Sin balón	611,99 $\pm$ 40,40	5,210	0,043
Con balón	591,30 $\pm$ 38,36		
tCBR			
Sin balón	1308,80 $\pm$ 81,16	12,380	0,005
Con balón	1228,75 $\pm$ 52,31		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar; t1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = tiempo total del movimiento.

Observamos que, en la comparación entre los tiempos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en la categoría *infantil*, se obtuvieron diferencias significativas en t1-2 ( $p = 0,014$ ), en tvuelo ( $p = 0,043$ ) y en tCBR ( $p = 0,004$ ) (Figura 26).

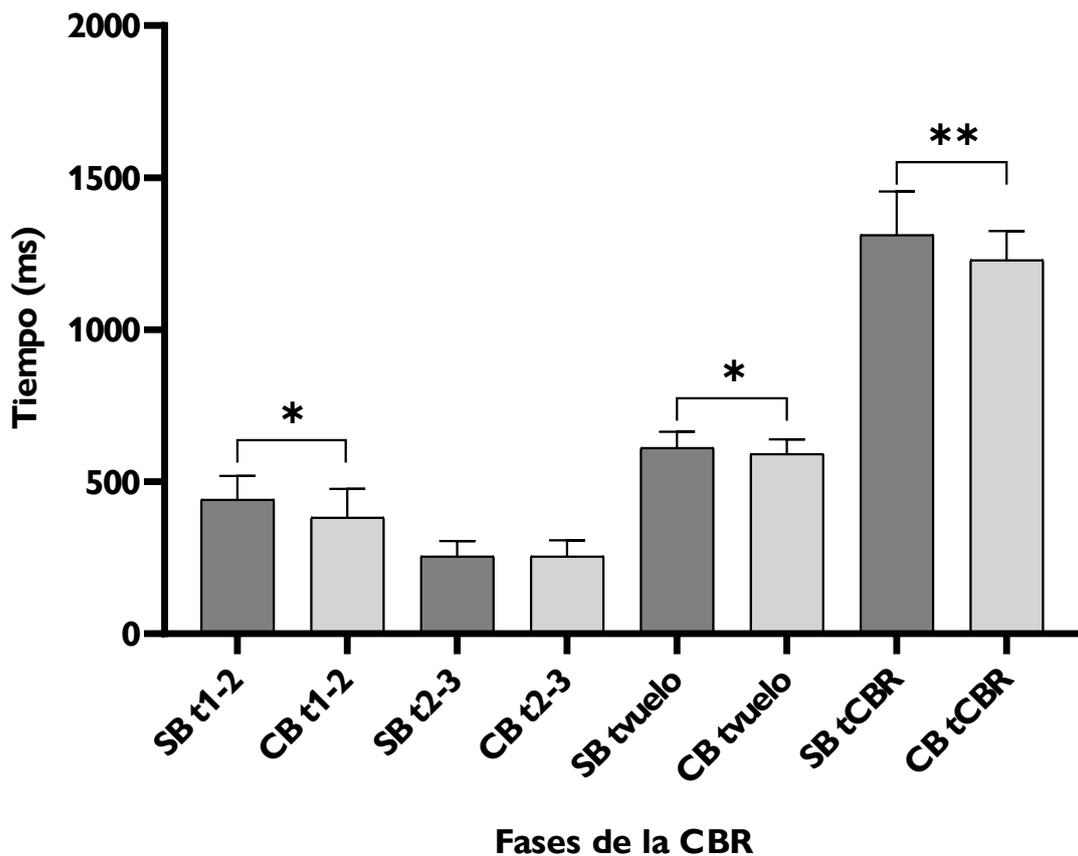


Figura 26. Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB de la categoría *infantil*. Las diferencias de significación mostradas son \*  $p < 0,05$  y \*\*  $p < 0,01$ . CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón; t1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = tiempo total del movimiento.

### Categoría cadete

En la tabla 19 se presentan la media y la DE, así como el valor del estadístico  $F$  y el valor  $p$  de la relación entre la CBR sin balón (SB) y con balón (CB), para cada fase de tiempo medido en la CBR (t1-2, t2-3, tvuelo, tCBR).

Tabla 19. Resultado de la significación de la variable *balón* (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada fase de tiempo medido en la CBR, comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

<b>Fases de la CBR</b>	<b>Media ± DE</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
<i>t</i> 1-2			
Sin balón	462,47 ± 44,34	27,47	< 0,001
Con balón	380,26 ± 64,89		
<i>t</i> 2-3			
Sin balón	272,56 ± 39,57	1,22	0,281
Con balón	257,72 ± 24,44		
<i>t</i> vuelo			
Sin balón	682,53 ± 48,00	1,06	0,326
Con balón	671,47 ± 37,78		
<i>t</i> CBR			
Sin balón	1417,56 ± 70,07	62,29	< 0,001
Con balón	1309,44 ± 92,71		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar; *t*1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; *t*2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; *t*vuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; *t*CBR = tiempo total del movimiento.

Observamos que, en la comparación entre los tiempos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en la categoría *cadete*, se obtuvieron diferencias significativas en *t*1-2 ( $p < 0,001$ ) y en *t*CBR ( $p < 0,001$ ) (Figura 27).

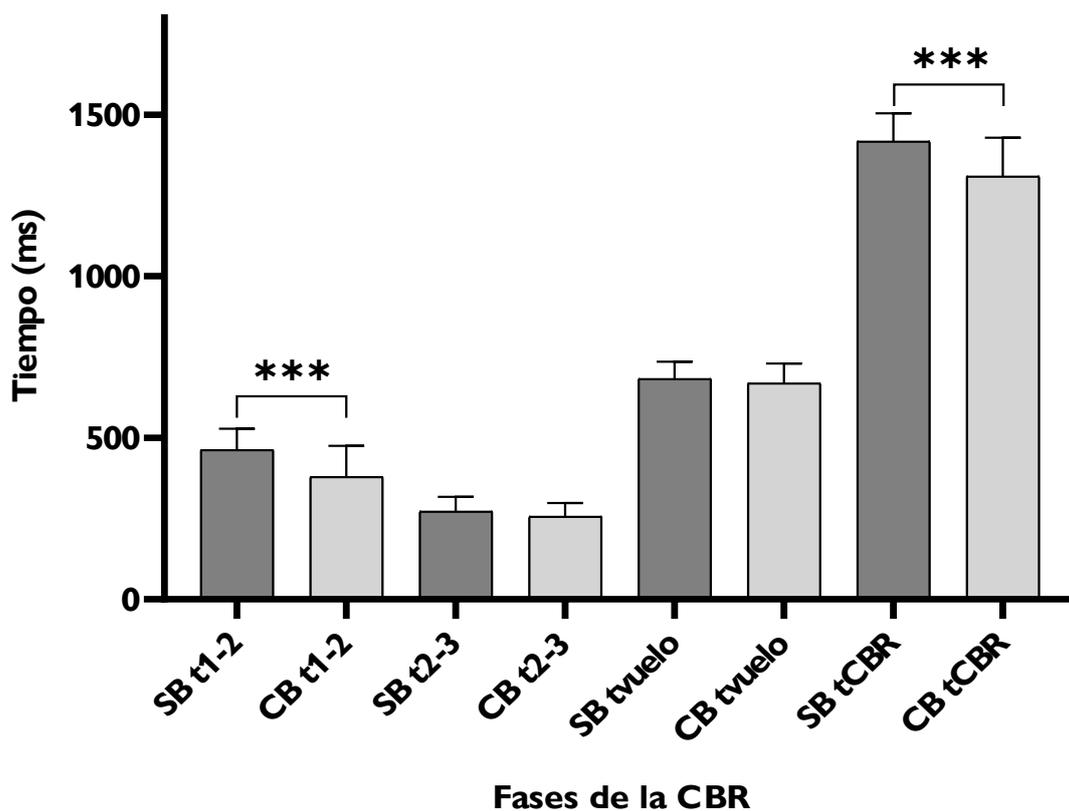


Figura 27. Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB de la categoría *cadete*. Las diferencias de significación mostradas son \*\*\*  $p < 0,001$ . CBR= Carrera batida de remate; SB= sin balón; CB= con balón; t1-2= tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3= tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = tiempo total del movimiento.

### Categoría juvenil

En la tabla 20 se presentan la media y la DE, así como el valor del estadístico  $F$  y el valor  $p$  de la relación entre la CBR sin balón (SB) y con balón (CB), para cada fase de tiempo medido en la CBR (t1-2, t2-3, tvuelo, tCBR).

Tabla 20. Resultado de la significación de la variable *balón* (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada fase de tiempo medido en la CBR, comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

<b>Fases de la CBR</b>	<b>Media <math>\pm</math> DE</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
$t_{1-2}$			
Sin balón	402,16 $\pm$ 29,46	2,210	0,165
Con balón	371,26 $\pm$ 78,12		
$t_{2-3}$			
Sin balón	238,67 $\pm$ 43,81	0,009	0,923
Con balón	238,96 $\pm$ 41,06		
$t_{vuelo}$			
Sin balón	685,05 $\pm$ 40,60	53,100	< 0,001
Con balón	651,35 $\pm$ 43,44		
$t_{CBR}$			
Sin balón	1325,89 $\pm$ 72,00	12,360	0,005
Con balón	1261,56 $\pm$ 90,78		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar;  $t_{1-2}$  = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado;  $t_{2-3}$  = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración;  $t_{vuelo}$  = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje;  $t_{CBR}$  = el tiempo total del movimiento.

Observamos que, en la comparación entre los tiempos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en la categoría *juvenil*, se obtuvieron diferencias significativas en  $t_{vuelo}$  ( $p < 0,001$ ) y en  $t_{CBR}$  ( $p = 0,005$ ) (Figura 28).

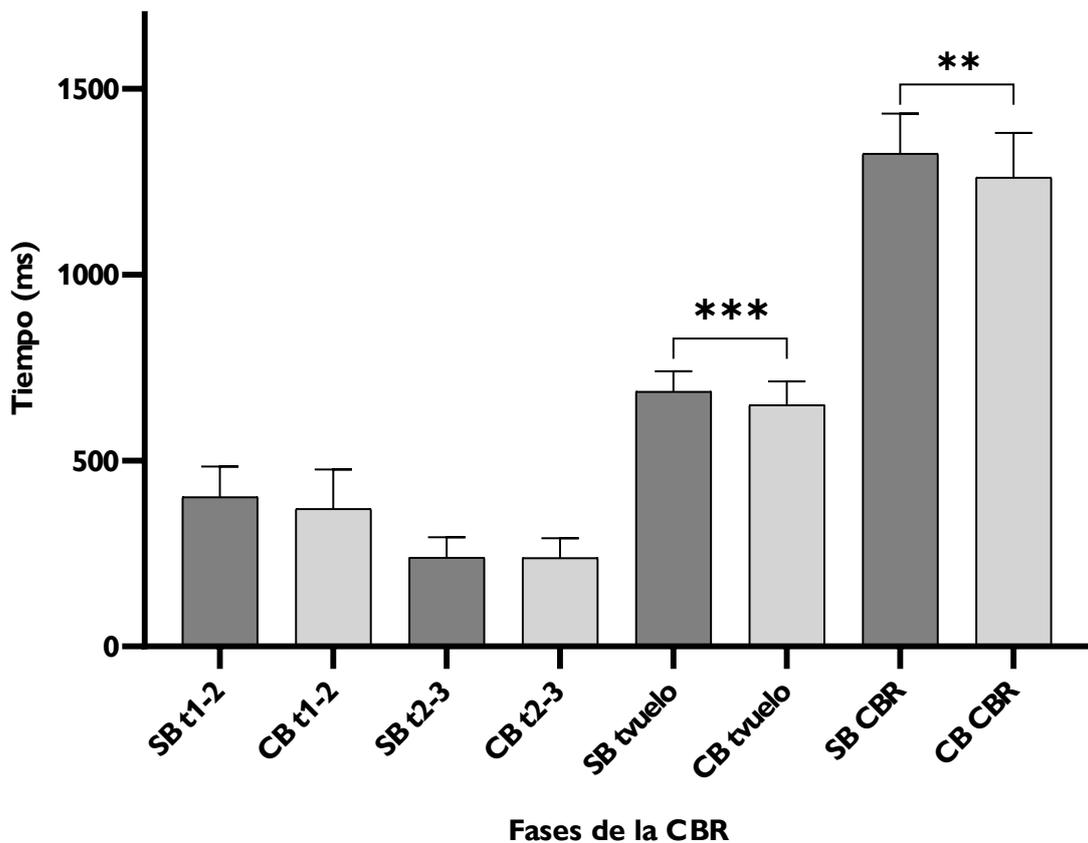


Figura 28. Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB de la categoría *juvenil*. Las diferencias de significación mostradas son \*\*  $p < 0,01$  y \*\*\*  $p < 0,001$ . CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón; t1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = tiempo total del movimiento.

### Categoría sénior

En la tabla 21 se presentan la media y la DE, así como el valor del estadístico  $F$  y el valor  $p$  de la relación entre la CBR sin balón (SB) y con balón (CB), para cada fase de tiempo medido en la CBR (t1-2, t2-3, tvuelo, tCBR).

Tabla 21. Resultado de la significación de la variable *balón* (sin y con) del modelo mixto para cada una de las fases del tiempo de la CBR. Se ha realizado un modelo independiente para cada fase. Media de la aceleración y desviación estándar de cada fase de tiempo medido en la CBR, comparando sin balón y con balón. Valor estadístico de F y valor de p de la relación sin y con balón.

Fases de la CBR	Media $\pm$ DE	Valor F	Valor p
t1-2			
Sin balón	421,54 $\pm$ 58,01	7,70	0,018
Con balón	380,52 $\pm$ 33,37		
t2-3			
Sin balón	235,29 $\pm$ 22,98	1,41	0,259
Con balón	246,91 $\pm$ 50,10		
tvuelo			
Sin balón	696,90 $\pm$ 38,68	16,25	0,002
Con balón	669,36 $\pm$ 26,46		
tCBR			
Sin balón	1353,73 $\pm$ 77,07	7,21	0,021
Con balón	1299,34 $\pm$ 63,99		

CBR= Carrera batida de remate; DE = desviación estándar; t1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = el tiempo total del movimiento.

Observamos que, en la comparación entre los tiempos resultantes en las fases de la CBR SB y CB en la categoría sénior, se obtuvieron diferencias significativas en t1-2 ( $p = 0,018$ ), en tvuelo ( $p = 0,002$ ) y en tCBR ( $p = 0,021$ ) (Figura 29).

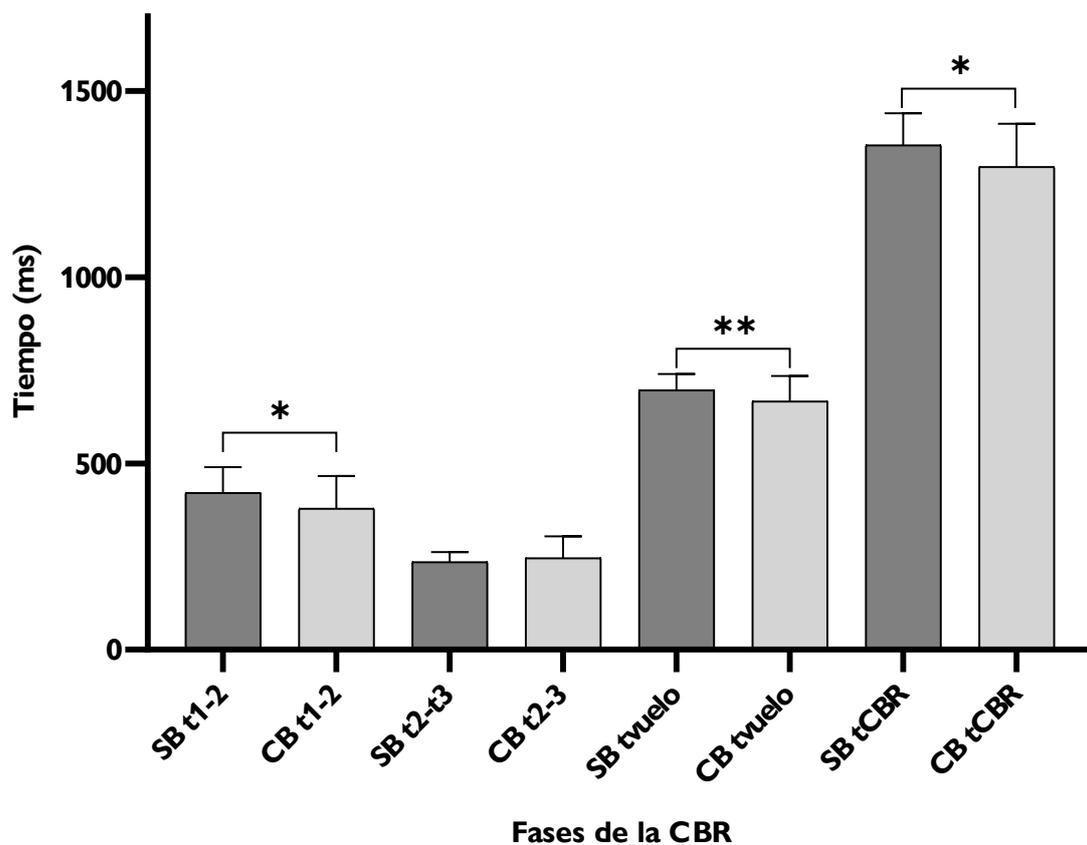


Figura 29. Comparación entre los tiempos de las fases de la CBR SB y CB de la categoría sénior. Las diferencias de significación mostradas son \*  $p < 0,05$ , y \*\*  $p < 0,01$ . CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón; t1-2 = tiempo entre el paso de orientación y el impulso de frenado; t2-3 = tiempo entre el impulso de frenado y el impulso de aceleración; tvuelo = tiempo desde el impulso de aceleración hasta el aterrizaje; tCBR = tiempo total del movimiento.

Técnica utilizada en la fase de aterrizaje:

Mediante las imágenes grabadas se analizó la técnica con la que se aterrizaba al final de la CBR, con las variables 1 = aterrizaje con una pierna y 2 = aterrizaje con dos piernas (Tabla 22).

Tabla 22. Valores del número y porcentaje de los tipos de aterrizaje en cada tipo de CBR por categoría.

Tipo de CBR	Técnica Aterrizaje	Infantiles		Cadetes		Juveniles		Sénior		Global	
			(%)		(%)		(%)		(%)		(%)
AIVSB	2	119	80,41	107	72,30	113	76,35	132	89,19	471	79,56
	1	29	19,60	41	27,70	35	23,65	16	10,81	121	20,44
AIVCB	2	74	50,00	66	44,59	85	57,43	89	60,14	314	53,04
	1	74	50,00	82	55,41	63	42,57	59	39,86	278	46,96
AIISB	2	130	87,84	125	84,46	120	81,08	132	89,19	507	85,64
	1	18	12,16	23	15,54	28	18,92	16	10,81	85	14,36
AIICB	2	78	52,70	90	60,81	90	60,81	93	62,84	351	59,29
	1	70	47,30	58	39,19	58	39,19	55	37,16	241	40,71

CBR= Carrera batida de remate; AIV = ataque por zona IV; All = ataque por zona II; SB = sin balón; CB = con balón  
1= aterrizaje con una pierna; 2= aterrizaje con dos piernas.

Tabla 23. Valores totales de acumulados de CBR sin balón (SB) y con balón (CB) y porcentaje de uso de cada técnica de aterrizaje por categoría.

Tipo de CBR	Infantiles		Cadetes		Juveniles		Sénior		Global	
	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB	SB	CB
n	296	296	296	296	296	296	296	296	1184	1184
2(%)	84,12	51,35	78,38	52,70	78,72	60,14	89,19	61,49	82,60	56,17
1(%)	15,88	48,65	21,62	47,30	21,28	39,86	10,81	38,51	17,40	43,83

CBR= Carrera batida de remate; SB = sin balón; CB = con balón; 1= aterrizaje con una pierna; 2= aterrizaje con dos piernas.

## Discusión

El objetivo de este estudio fue analizar la transmisión de las fuerzas de impacto en la zona lumbar durante la CBR, con y sin el condicionante del balón, en jugadoras de diferentes categorías de un club de voleibol de élite.

El principal hallazgo es que la CBR con el condicionante del balón incrementa las fuerzas de impacto en la mayoría de los apoyos, en comparación con la CBR sin el condicionante del balón, corroborando parcialmente la primera hipótesis de este estudio. Concretamente, las fuerzas de impacto medidas a nivel de la vértebra L5 fueron superiores con balón en *a1*, *a3* y *a5*. Estos resultados pueden atribuirse a que el condicionante del balón requiere ajustes constantes en la longitud de la zancada, en el tiempo de reacción y en la aproximación al balón, tal y como describió Wagner (2009), lo que conlleva unas superiores demandas motoras, cognitivas y sensoriales, dada la mayor complejidad del movimiento (Kudo, 2008).

Especialmente sorprendente ha resultado obtener fuerzas de impacto superiores en *a5*, en su realización con el condicionante del balón. A pesar de que las jugadoras tratan de alcanzar la mayor altura posible en el salto a partir de la optimización de la velocidad de aproximación en las dos condiciones (Forthomme et al., 2005; Fuchs, Fusco, et al., 2019; Ikeda et al., 2017; Wagner et al., 2009), es con el condicionante del balón donde el rendimiento conseguido fue menor, tal y como se deduce si nos atenemos al menor tiempo de vuelo registrado. Precisamente, este menor tiempo de vuelo es el que supuestamente debería reflejarse en una fuerza de impacto en *a5* menor. Una posible explicación de este resultado es que, en la CBR con balón, las jugadoras suelen caer de forma más desequilibrada por la asimetría que genera el golpeo del balón en el aire (Marquez et al., 2009), lo que origina una menor eficiencia en la amortiguación del impacto, a pesar del menor tiempo de vuelo. A su vez, seguramente las jugadoras prestan menor atención a la caída, ya que el foco de atención se centra en seguir la trayectoria descrita por el balón después del contacto (Lenoir et al., 1999; Müller & Abernethy, 2012).

Se aprecia una transmisión de la fuerza de impacto en *a1* algo superior (8,47%) cuando se realiza la CBR con balón, lo que puede estar asociado a un inicio más brusco por el hecho de que la colocación determina el momento de inicio y la velocidad adecuada de la CBR (Lobietti, 2010). Una mayor altura en el salto en la CBR se consigue mediante un acercamiento enérgico que se refleja, en primera instancia, en *a1* y, posteriormente, en *a2* y *a3* (Fuchs, Menzel, et al.,

2019a). Fue el mismo Fuchs quien describió que el valor de  $a1$  condiciona la velocidad de aproximación y la capacidad de transformar esta energía en altura en el salto.

Sorprendentemente, la fuerza de impacto en  $a2$  fue muy superior en la CBR sin balón (48,86%). Con el condicionante del balón,  $a2$  es decisivo para ajustar adecuadamente la CBR a la trayectoria del balón. Es el momento en el que la jugadora debe intuir el lugar donde deberá golpear el balón a partir de la interpretación del inicio de la trayectoria del balón y este acto voluntario enlentece el movimiento (Loffing & Cañal-Bruland, 2017; Müller & Abernethy, 2012; Nettleton, 1979; Tresilian, 2004). Cabe destacar que, en este apoyo, las jugadoras solo podían ver una pequeña parte de la trayectoria del balón. Por otro lado, debemos resaltar que la altura que alcanzaba el balón durante la colocación en este estudio no permitía, en  $a1$ , ver una parte de la trayectoria del balón, ya que coincidía con el contacto del colocador con el balón. De alguna manera,  $a2$  con balón se asemeja a  $a1$  sin balón.

Los valores de  $t1-2$  con el condicionante del balón fueron menores (12,37%) de lo que era esperado, si atendemos a los resultados obtenidos en  $a1$  y  $a2$ . No existe consenso en la literatura en cuanto a si el valor de  $t1-2$  tiene relación directa con la altura del salto. Liu et al. (2001) encontraron un mayor impacto en  $a2$  y  $a3$  en la CBR con balón cuando  $t1-2$  era más largo. Shahbbazi et al. (2007) no encontraron diferencias en la altura del salto al realizar dos tipos de aproximación: paso amplio con avance rápido del centro de gravedad vs. paso corto con avance lento del centro de gravedad. No obstante, en posteriores estudios se ha observado cómo la longitud del paso entre  $a1$  y  $a2$  es una de las estrategias de los deportistas para conseguir la velocidad óptima durante  $t1-2$  (Fuchs, Fusco, et al., 2019). La disminución del valor de  $t1-2$  registrada en nuestro estudio fue fruto, probablemente, de la necesidad de orientarse adecuadamente hacia el balón colocado con el objetivo de optimizar la velocidad de toda la CBR. Este proceso de ajuste con el balón originó valores más bajos en las fuerzas de impacto de  $a2$  como consecuencia de una deceleración del centro de gravedad para conseguir un ritmo adecuado que permitiese obtener una mayor velocidad en el  $t2-3$  y en  $a3$  (Ikeda et al., 2017; H. Wagner et al., 2009), que conforman la fase de despegue. Los valores inferiores en  $a2$  en la CBR con el condicionante del balón, también denominados impulso de frenado de la fase de la batida de la CBR (Valadés Cerrato et al., 2013), muestran la estrategia del deportista para acumular energía durante la acción excéntrica de la musculatura extensora de la pierna (Kovalev, 1978). Además, durante la coordinación con el balón se realiza una amortiguación del tren inferior que

es superior a la registrada cuando se realiza la CBR sin el balón, reduciendo de esta forma las fuerzas de impacto transmitidas a la zona lumbar.

La fase de la batida, además de  $a_2$  (impulso de frenado), se compone de  $t_{2-3}$  y  $a_3$  o impulso de aceleración (Valadés Cerrato et al., 2013). El valor de  $t_{2-3}$  en la CBR con balón fue muy similar al de la CBR sin balón (-0,39%) y los valores de las fuerzas de impacto en  $a_3$  fueron superiores (3,81%) en la condición con balón. El  $t_{2-3}$  y  $a_3$  utilizan la energía acumulada en  $a_1$  y  $a_2$ , con el objetivo de conseguir maximizar el despegue (Valadés Cerrato et al., 2013). Los valores obtenidos en nuestro estudio muestran unas fuerzas de impacto en  $a_3$  superiores con balón, fruto de la mayor energía acumulada durante los primeros pasos de la CBR, maximizando el despegue. La habilidad de optimizar la velocidad de aproximación horizontal en la CBR durante  $a_1$  y  $t_{1-2}$  y la de decelerar en  $a_2$  para convertirla en velocidad vertical durante  $a_3$ , será la que generará correlación positiva con el resultado del salto final (Fuchs, Fusco, et al., 2019).

La regulación de la aceleración en la CBR realizada para llegar a golpear el balón adecuadamente dio lugar a un *tvuelo* inferior (3,39%) en comparación con la CBR sin balón. La necesidad de calcular la trayectoria del balón y de coordinarse con él impide realizar el movimiento con los ángulos articulares más idóneos en las extremidades inferiores para conseguir la máxima altura en el salto (Montoro, 2015; Moras & López, 1995; Wagner et al., 2009), situación que sí es reproducible cuando se hace una CBR sin balón o con el balón colgado.

Contrariamente, a pesar de registrar un *tvuelo* más bajo, las fuerzas de impacto en  $a_5$  fueron superiores (12,43%) en la CBR con balón. Las fuerzas de impacto en  $a_5$  se definen principalmente por dos factores: la técnica en el aterrizaje, ya sea con el mecanismo de amortiguación realizado con la flexión de las rodillas (Elvin et al., 2007) o por la capacidad de sujeción muscular de los músculos de los muslos (Salci et al., 2004); y el tipo de aterrizaje, ya sea con dos piernas o con una (Lobiatti, 2010; Marquez et al., 2009; Tillman et al., 2004). Además, durante el *tvuelo*, el golpeo del balón ( $a_4$ ) provoca que el movimiento sea asimétrico, debido al hecho de que el golpeo se realiza con una mano, generando un desequilibrio que deberá compensarse durante el aterrizaje (Marquez et al., 2009), lo que puede modificar su ejecución técnica y el tipo de aterrizaje realizado. En el estudio de Tillman (Tillman et al., 2004) realizado en juego real, el aterrizaje se realiza en un 45% de los casos con una pierna. En nuestra investigación, también aterrizaron con una pierna en un 44% de los casos, mientras que, sin el condicionante del balón, solo un 17% de los aterrizajes se realizaron con una pierna. El hecho

de aumentar el número de aterrizajes con una pierna disminuye la posibilidad de usar la técnica más adecuada para amortiguar y disminuir las fuerzas de impacto. Además, sabemos que las fuerzas de impacto disminuirán principalmente al aumentar la flexión de rodilla, con una correlación no lineal en saltos verticales (Elvin et al., 2007), aumentarán al incrementarse la rigidez de la rodilla en el momento del aterrizaje (Marquez et al., 2009) y disminuirán al aumentar la capacidad de sujeción de los músculos del muslo, observándose menor eficacia en las mujeres (Salci et al., 2004). Cuando el aterrizaje es a una pierna, aumenta la exigencia de los músculos del muslo, incrementándose a su vez la rigidez de la articulación de la rodilla.

Para reducir las fuerzas de impacto en *a5* las jugadoras deben adoptar nuevos patrones motores (Bressel & Cronin, 2005). En este sentido, el aumento de aterrizajes con una pierna en la CBR con balón fuerza a las jugadoras a aprender de forma correcta el aterrizaje *land and go*, en lugar del habitual *land and stop* (McNitt-Gray, 2000) con la finalidad de mejorar la amortiguación y minimizar la posibilidad de lesiones producidas por excesivas fuerzas de impacto debidas a un mal aterrizaje (Marquez et al., 2009). En el aterrizaje *land and go*, la jugadora, al apoyar la primera pierna, continuará el movimiento con uno o dos pasos más que le ayudarán a mejorar la amortiguación y a no sobrecargar la misma pierna en cada salto. A pesar de la cercanía a la red y de que la técnica de la CBR promueve un aterrizaje bipodal *land and stop* para evitar tocar la red, pudimos observar en nuestro estudio cómo con el condicionante del balón se modificó el patrón de la CBR en cada paso y, con ello, las fuerzas de impacto resultantes en *a5*. Estas fuerzas podrían haber sido mayores si los aterrizajes a una pierna no hubiesen sido en su mayoría del tipo *land and go*, los cuales hubieran suavizado el aterrizaje y ayudado a su amortiguación. Estas adaptaciones en la CBR no las observamos en la realización sin balón ya que, al no tener que coordinarse con el balón, la jugadora puede realizar un movimiento más fluido (Wagner et al., 2009) y estar más pendiente de la amortiguación durante el aterrizaje.

Como preveíamos, el *tvuelo* y el *tCBR* fueron mayores en la CBR sin el condicionante del balón (3,47% y 5,67% respectivamente). Ikeda (2017) mostró cómo el ritmo fluido y la coordinación son los que permiten una mayor altura y *tvuelo* al medir la altura del salto a través del dispositivo VERTEC. Ikeda definió los factores más importantes para conseguir la máxima altura del salto y, por consiguiente, mayor *tvuelo* en la CBR: la velocidad vertical del centro de gravedad en el despegue, la velocidad horizontal en el contacto del segundo paso de la batida de despegue y la desaceleración de la velocidad horizontal del centro de gravedad desde el apoyo

del segundo paso de la batida hasta el despegue. Además, comprobó que en las mujeres no era tan importante conseguir la máxima velocidad horizontal en  $a1$  como en los hombres. Las mujeres mostraron mayor y mejor correlación en la capacidad de desacelerar esa velocidad horizontal durante  $t1-2$  y hasta  $a2$ . En nuestro estudio, observamos cómo esta fluidez se rompió con el condicionante del balón, debido a los ajustes realizados en los primeros pasos de la CBR, que generaron valores superiores en la fuerza de los impactos en  $a1$  y  $a3$ , y menores en  $a2$ , impidiendo alcanzar alturas de salto parecidas a las obtenidas sin el condicionante del balón.

El *tvuelo* en la CBR sin balón no mostró un aumento de las fuerzas de impacto en  $a5$ , como ya observó Elvin (2007) cuando comprobó que no había una alta correlación entre la altura del salto y las fuerzas de impacto en saltos sin balón, ya que la técnica y el tipo de aterrizaje utilizado podían modificar la capacidad de amortiguación de los/as deportistas. La mayor fluidez en el movimiento y la posibilidad de empezar la CBR sin ningún condicionante son los factores que pueden explicar valores superiores en el *tvuelo* y en el *tCBR*. Estos resultados nos permitirían abrir una nueva vía de investigación que podría ser de interés para los entrenadores, en la que se estudiaran las diferencias en cuanto a la VM entre la CBR con y sin el condicionante del balón, para determinar las similitudes entre ambos patrones de movimiento para un mismo gesto técnico.

El hecho de que nuestro estudio se realizase con una colocación real, a diferencia de los estudios anteriores donde el balón estuvo colgado (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Wagner et al., 2009), permitió analizar la CBR en una situación más próxima a la que se daría en el juego real, obteniendo así valores más cercanos a la realidad del juego y con una mayor aplicación a los entrenamientos (Oliveira et al., 2020; Serrien et al., 2016a).

### **Diferencias obtenidas en la categoría infantil**

En categoría *infantil* se esperaba, por su poca experiencia en el deporte, encontrar mayores diferencias en la transmisión de las fuerzas de impacto a la zona lumbar cuando se realizase la CBR con balón. Preveíamos que, al no tener tan asimilado el PM específico de la CBR, se detectarían muchas diferencias en todas las variables estudiadas al comparar su realización con y sin el condicionante del balón. Al observar su realización y analizar los datos pudimos percibir cómo las CBR con balón y sin balón eran muy similares, mostrándose quizás más irregulares en el momento concreto de impactar con el balón, golpeando en ocasiones en

el punto óptimo y otras veces en fase de caída. Este hecho nos hizo entender que las jugadoras en esa etapa aún tienen dificultades para leer la trayectoria del balón y coordinarse con el balón. Reprodujeron el PM sin hacer los ajustes necesarios para coincidir lo mejor posible con el balón. Aun así, observamos en la CBR sin balón un aumento en  $t_{1-2}$ , mostrando una amplitud mayor del paso de orientación respecto a la CBR con balón. Esta mayor amplitud afectaría a  $a_2$  transmitiendo unas fuerzas de impacto superior que en la CBR con balón para poder desacelerar. Es sabido que la potencia en la extensión de la rodilla es relevante en general para saltos verticales y que será especialmente importante para desacelerar correctamente la velocidad de aproximación durante la CBR en el voleibol femenino (Fuchs, Menzel, et al., 2019a), por lo que el requerimiento que se le pedirá a la musculatura de la jugadora en ese momento será más alto, dando lugar a un aumento en las fuerzas de impacto a nivel de la zona lumbar por la mayor longitud del paso anterior y la maduración temprana de la jugadora a nivel muscular. Pudimos intuir que se corroboró este hecho al no encontrar diferencias en las fuerzas de impacto de  $a_3$  que ayudaran al despegue. Podemos pensar que este momento madurativo no le permitiría doblar la rodilla de forma controlada para favorecer la preactivación y el ciclo de estiramiento-acortamiento y para que pueda así mejorar la distancia de aceleración para la extensión de la articulación (Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Pääsuke et al., 2001), no consiguiendo entonces transmitir de forma efectiva la velocidad adquirida en la horizontal mediante una desaceleración coordinada en los últimos pasos del despegue (Ikeda et al., 2017). De esta forma, vimos un pequeño aumento en el tiempo de vuelo en la CBR sin balón que no concuerda con la gran diferencia obtenida en el  $a_2$ , por lo que podríamos apuntar que fue una consecuencia directa de la imposibilidad de transmitir las fuerzas de impacto generadas en los diferentes apoyos para conseguir una CBR eficiente, ya fuese por maduración muscular temprana o por problemas coordinativos. En cuanto al  $t_{CBR}$ , también vimos que fue superior en la realización sin balón, reafirmando que en la CBR con balón se generaron tiempos totales más bajos por la necesidad de coordinación con el balón y el tiempo de vuelo más bajo al impactar el balón durante el salto. En consecuencia, podríamos apuntar que las jugadoras infantiles tienen una técnica de la CBR poco consolidada que les impediría aprovechar las fuerzas de impacto a nivel de la zona lumbar en cada paso para generar una transmisión lo más eficiente posible, pudiendo apuntar que estarían superando la etapa inicial y adentrándose en la etapa elemental del aprendizaje del PM (Ruiz Pérez, 1994).

### **Diferencias obtenidas en la categoría cadete**

Como esperábamos, en categoría *cadete* se encontraron diferencias entre los valores de la CBR con y sin balón respecto a las fuerzas de impacto a nivel de la zona lumbar en todos sus apoyos,  $a1$ ,  $a2$  y  $a3$ , excepto en  $a5$ . En las jugadoras cadetes se inició la CBR con balón, con una diferencia superior en los valores de las fuerzas de impacto en  $a1$ . Este resultado en  $a1$ , previo a  $t1-2$ , justificó la disminución del  $t1-2$  del paso de orientación en la CBR con balón respecto a la CBR sin balón, ya que el momento del empuje en  $a1$  determinaría irreversiblemente la velocidad de aproximación que tendría el paso de orientación (Fuchs, Menzel, et al., 2019a). Esta reducción de tiempo en la CBR con balón desencadenó un aumento en la transmisión de las fuerzas de impacto en  $a2$  y en  $a3$ . Con este aumento trataron de conseguir una coordinación en la desaceleración de  $a1$  y  $t1-2$  que permitiese una transmisión correcta hasta  $a3$ , mediante las fuerzas de impacto de  $a2$  y  $t2-3$ , para conseguir un despegue óptimo que diera como resultado la máxima altura en el salto (Chen & Huang, 2008; Ikeda et al., 2017). Precisamente fue la categoría *cadete* la única en la que no se encontraron diferencias en el *tvuelo* entre las CBR con y sin balón. Tampoco se encontraron diferencias en las fuerzas de impacto producidas en  $a5$ . Estos valores descritos para la categoría *cadete* empezaron a diferenciar las dos CBR estudiadas, de forma que pudimos observar cómo las jugadoras transitaban el estadio elemental de la evolución del PM (Ruiz Pérez, 1994), mostrando cambios respecto a lo ocurrido en la etapa inicial del patrón en infantiles y la etapa madura observada en juveniles y sénior. La aparición de valores similares en el *tvuelo* en esta categoría pudo deberse a que en la etapa *cadete*, con jugadoras entre 14 y 16 años, al tener una media de experiencia de 6,08 años, pero con una desviación de 1,24, hubiese mucha heterogeneidad entre los niveles de experiencia en el juego y, presumiblemente, en su etapa de maduración física. Así, las jugadoras en categoría *cadete* mostraron un mayor conocimiento del PM que las infantiles que les permitió coordinar mejor la CBR con la trayectoria del balón y conseguir un *tvuelo* que les permitió aterrizar con una amortiguación similar en ambas CBR, con y sin el condicionante del balón.

### **Diferencias obtenidas en la categoría juvenil**

A diferencia de lo esperado en nuestra hipótesis, las jugadoras juveniles lograron una transmisión de fuerzas de impacto en la zona lumbar similar en ambas CBR, con y sin balón, en todos sus apoyos excepto en  $a2$ , donde se observaron valores muy superiores en la CBR sin balón. Los valores superiores de  $a2$  en la CBR sin balón se produjeron en el momento del

intercambio de la velocidad horizontal hacia la vertical mediante la habilidad de desacelerar correctamente el movimiento para tener un mejor despegue (Ikeda et al., 2017). A pesar de que en el inicio de la CBR no se dieran diferencias ni en  $a1$  ni en  $t1-2$ , seguía habiendo una afectación en las fuerzas de impacto transmitidas a nivel de la zona lumbar en  $a2$ , lo que nos permitió corroborar que este paso podría constituir un momento crítico para poder coordinarse con el balón. Además, a pesar de tener diferencias solo en este punto de la CBR, a nivel de fuerzas de impacto se siguieron observando disminuciones en el tiempo de vuelo y en el  $tCBR$  cuando aparecía el condicionante del balón. Por todo esto, podríamos decir que el ajuste que deben hacer las jugadoras en  $a2$ , cuando aparecía el balón, condicionaba la coordinación del movimiento y la habilidad para desacelerar y lograr que los pasos previos al salto ayudasen a conseguir su máximo rendimiento (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Ikeda et al., 2017). Por lo tanto, podríamos decir que el PM de la CBR de las juveniles en cuanto a la transmisión de la fuerza de impactos a nivel de la zona lumbar era un patrón más maduro, más estable y con menos afectación en la aparición del condicionante del balón, consiguiendo minimizar las diferencias en cuanto a la reacción al visualizar la colocación gracias a un mayor control de los mecanismos de obtención de la información debido a su condición de jugadoras avanzadas y expertas (Loffing & Cañal-Bruland, 2017; Müller & Abernethy, 2012; Tresilian, 2004; Vickers, 1992). De esta forma, se minimizarían las diferencias en el inicio de la CBR a pesar del condicionante del balón, pudiendo adaptarse con un poco más de tiempo a los pasos finales de la batida y consiguiendo una amortiguación similar en el aterrizaje en ambos casos.

### **Diferencias obtenidas en la categoría sénior**

Como esperábamos en nuestra hipótesis, fue la categoría en la que se obtuvieron los valores más similares en las dos condiciones, al presentar un PM más maduro y consolidado, fruto de los años de experiencia en su realización, tanto con balón como sin balón. En este sentido, vimos como no hubo diferencias en  $a1$  gracias a un mayor control de los mecanismos de obtención de la información (Tresilian, 2004; Vickers, 1992) y a la capacidad de ejecutar antes la acción, gracias al uso de claves que les permitieron anticipar la trayectoria del balón (Abernethy, 1990; Loffing & Cañal-Bruland, 2017; Müller & Abernethy, 2012). Existió una ligera disminución en el  $t1-2$  de la CBR con balón que permitió mantener la máxima velocidad horizontal para transformarla en la mayor velocidad vertical posible (Wagner et al., 2009). Ya en el  $a2$ , se generó de nuevo una mayor transmisión de las fuerzas de impacto en la zona lumbar

cuando se realizó sin balón. El hecho de no tener el condicionante del balón permitió continuar el movimiento de forma fluida y no entrar en un proceso de desaceleración necesario para coordinar con el balón en el aire (Fuchs, Fusco, et al., 2019). Este hecho se vio reforzado al comprobar que el tiempo de  $t_{2-3}$  hasta el despegue, en la CBR con balón, fue más alto para terminar de ajustar la desaceleración de la velocidad horizontal y preparar el ángulo de la rodilla y de la cadera adecuados para el último paso del despegue (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Ikeda et al., 2017) que, en el caso de las jugadoras sénior, obtuvieron valores similares de transmisión de las fuerzas de impacto en la zona lumbar. Esta capacidad de ajuste en los tiempos ( $t_{1-2}$  y  $t_{2-3}$ ) y en la transmisión de los impactos de los pasos ( $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$ ) repercutieron en pequeñas disminuciones en el  $tvuelo$  y en el  $t_{CBR}$  en la CBR con balón respecto a la CBR sin balón. De esta forma, observamos que las jugadoras sénior realizaron su CBR como un PM consolidado, en el cual utilizaron su nivel de experiencia para ajustar su centro de gravedad durante toda la CBR. Su experiencia les permitió, en la CBR con balón, conseguir el valor más alto en  $a_5$  de todas las categorías para golpear el balón con mayor fuerza (Serrien et al., 2016a). Este valor les generó un mayor desequilibrio a compensar para aterrizar de manera segura (Marquez et al., 2009). Además, pudimos observar cómo el hecho de que fue la categoría que consiguió mayor porcentaje de aterrizajes con los dos pies a la vez (61,5%) en la CBR con balón revirtió directamente en los valores más altos de transmisión de las fuerzas de impacto en el aterrizaje. Al ser jugadoras experimentadas, consiguieron ajustar correctamente respecto a la red con aterrizajes *land and stop*, minimizando así el riesgo de ir contra ella con aterrizajes tipo *land and go* (Lobiatti, 2010). El aumento del número de aterrizajes a dos pies, sumado a una mayor agresividad mostrada durante la CBR, determinó los valores más altos de todas las categorías en la transmisión de las fuerzas de impacto a nivel de la zona lumbar en el  $a_5$ . Estos resultados fueron contrarios a los encontrados anteriormente por Cheng et al. (2005), en que las jugadoras mostraron una mayor capacidad para disminuir las fuerzas de impacto que se generaron en la recepción del salto tras el remate cuanto mayor era su nivel de experiencia. En este caso, de nuevo nos encontramos un estudio realizado con el balón fijado con una cuerda, por lo que podríamos apuntar que los estudios realizados en condiciones de balón en movimiento mediante un pase de colocación, como es el caso de nuestro estudio, ampliarían la visión sobre la CBR y acotarían de una forma más veraz la realidad de los/as deportistas en el juego. Así, las jugadoras sénior mostraron un patrón más maduro fruto de su mayor experiencia (Ruiz Pérez, 1994) y

con una mayor finura y precisión en los gestos técnicos que les permitió tener los valores más altos en  $\sigma_4$  al impactar el balón.

## **Conclusiones**

Las fuerzas de impacto en la CBR con el condicionante del balón son superiores a las producidas en la CBR sin el condicionante del balón en la mayoría de los apoyos.

El  $t_{CBR}$  y el  $tvuelo$  fueron superiores en la CBR realizada sin balón.

## **Perspectivas de futuro**

La metodología utilizada para medir las fuerzas de impacto a nivel lumbar puede ayudar a prevenir lesiones de espalda, avisando a las jugadoras con impactos excesivos que puedan desencadenar lesiones graves como la espondilólisis.

Las fuerzas de impacto medidas a través de microtecnología pueden y deberían ayudar a los entrenadores a conocer la influencia de los ejercicios y metodologías utilizadas durante el aprendizaje y tecnificación del remate en voleibol.

Establecer patrones individuales de las fuerzas de impacto en cada apoyo de la CBR nos permitirá identificar sus puntos de mejora para optimizar su ritmo y coordinación, evitando la aparición de patrones potencialmente lesivos.

**8.3. Estudio 2: Análisis de la variabilidad de la carrera batida de remate realizada por los lados derecho e izquierdo del campo, con balón y sin el condicionante del balón.**



## Objetivo principal

Analizar la variabilidad de movimiento de la CBR realizada por los lados derecho e izquierdo del campo, con balón y sin el condicionante del balón.

## Hipótesis

H<sub>1</sub>: La variabilidad de movimiento de la CBR sin el condicionante del balón será similar por la parte derecha e izquierda del campo.

H<sub>2</sub>: La variabilidad de movimiento de la CBR con el condicionante del balón será más alta que sin el condicionante del balón.

H<sub>3</sub>: La variabilidad de movimiento de la CBR con el condicionante del balón será mayor por la parte derecha del campo.

## Análisis de datos

Para el análisis de los datos se empleó primeramente el software específico del WIMU (Spro WIMU, Realtrack Systems, Almería, España), de donde se obtuvo la señal cruda y se realizó un primer análisis visual de la señal para comprobar su nitidez. Se calculó la aceleración total ( $a_t$ ) usando la suma de vectores en tres dimensiones: vertical ( $z$ ), anteroposterior ( $y$ ) y mediolateral ( $x$ ). Se aplicaron cortes a la señal por cada repetición de la CBR desde el inicio ( $a_1$ ) hasta el final ( $a_5$ ), obteniendo un total de 384 señales de los bloques de 6 CBR. Estas señales fueron exportadas al software Excel, en el que se calculó la entropía muestral ( $SampEn$ ) para cada señal según Goldberger et al. (2000) mediante rutinas dedicadas programadas en Matlab® (The MathWorks, Massachusetts, USA).

## Análisis estadístico

En primer lugar, se realizó la estadística descriptiva para las variables *respuesta de interés* ( $SampEn$ ) con los estadísticos de resumen *media*, *desviación estándar* (DE) e *intervalo de confianza al 95% para la media* (IC 95%), para cada grupo de la variable explicativa principal (tipo de ataque) y también a nivel global.

Para evaluar si existen diferencias en la variable *respuesta entropía* debidas al tipo de ataque, se analizó la variable *respuesta SampEn* mediante un Modelo Lineal Mixto, teniendo en cuenta la variable explicativa principal, *tipo de ataque* (con y sin balón), y la variable explicativa secundaria *zona* (zona II y zona IV), así como su interacción como factores fijos. La variable

*jugadora* se introdujo como un factor aleatorio para controlar la variabilidad de la jugadora (medida repetida). También se introdujo la interacción *jugadora por tipo de ataque* (Jugadora\*Tipo de Ataque) como efecto aleatorio, a fin de controlar la variabilidad individual de la jugadora por tipo de ataque.

En caso de obtener un resultado significativo, se realizaron los contrastes 2 a 2 *a posteriori*. Para poder corregir el error de tipo I en los contrastes múltiples, los p-valores obtenidos se corrigieron mediante el ajuste por multiplicidad de contrastes de Tukey.

La lectura, gestión y validación de la base de datos se realizó con el software SAS v9.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

## Resultados

En el estudio 2, los resultados de las características de las jugadoras fueron analizados en global (Tabla 24).

Tabla 24. Valores de medias  $\pm$  DE de las características del global de las jugadoras.

<b>Jugadoras</b>	<b>Edad</b>	<b>Altura</b>	<b>Peso</b>	<b>Experiencia</b>
<b>(n)</b>	<b>(años)</b>	<b>(m)</b>	<b>(kg)</b>	<b>(años)</b>
48	17,56 $\pm$ 3,60	1,77 $\pm$ 0,05	66,53 $\pm$ 7,09	7,98 $\pm$ 3,91

n= número de jugadoras; m= metros; kg= kilogramos.

En la tabla 25, los resultados descriptivos indican que hay igualdad en los valores entre zonas, mientras que sí se ven diferencias con el condicionante del balón.

Tabla 25. Estadísticos descriptivos de las variables *SampEn* (a.u.) con los condicionantes de las zonas y del balón.

		<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>DE</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Inferior CL 95%</b>	<b>Superior CL 95%</b>	<b>CV %</b>
	Global	384	0,075	0,073	0,019	0,127	0,035	0,073	0,077	25,333
Sin balón	Zona II	96	0,062	0,062	0,011	0,090	0,039	0,059	0,064	17,742
Sin balón	Zona IV	96	0,061	0,062	0,011	0,088	0,035	0,059	0,063	18,033
Con balón	Zona II	96	0,089	0,088	0,015	0,127	0,058	0,086	0,092	16,854
Con balón	Zona IV	96	0,089	0,088	0,013	0,121	0,056	0,086	0,092	14,607

n = número de repeticiones de bloques; DE = desviación estándar; CL = límite de confianza; CV = coeficiente de variación.

En la tabla 26 se observa cómo, para los valores de *SampEn*, existe igualdad entre las zonas evaluadas, mientras que hay diferencias con el condicionante del balón (con y sin balón). De esta forma, se puede prever que no haya un efecto significativo para la interacción *zona*, pero sí lo haya para la interacción con el balón (Figura 30).

Tabla 26. Estadísticos de resumen para la variable *SampEn* (a.u.) según los condicionantes de la zona del campo (zona II y zona IV) y del balón (con y sin balón).

<b><i>SampEn</i></b>	<b>Global</b>	<b>Zona II</b>	<b>Zona IV</b>
	0,075 ± 0,019 (0,073 – 0,077)	0,075 ± 0,019 (0,073 – 0,078)	0,075 ± 0,018 (0,072 – 0,078)
Sin balón	0,061 ± 0,011 (0,060 – 0,063)	0,062 ± 0,011 (0,059 – 0,064)	0,061 ± 0,011 (0,059 – 0,063)
Con balón	0,089 ± 0,014 (0,087 – 0,091)	0,089 ± 0,015 (0,086 – 0,092)	0,089 ± 0,013 (0,086 – 0,092)

Media ± DE (IC95%)

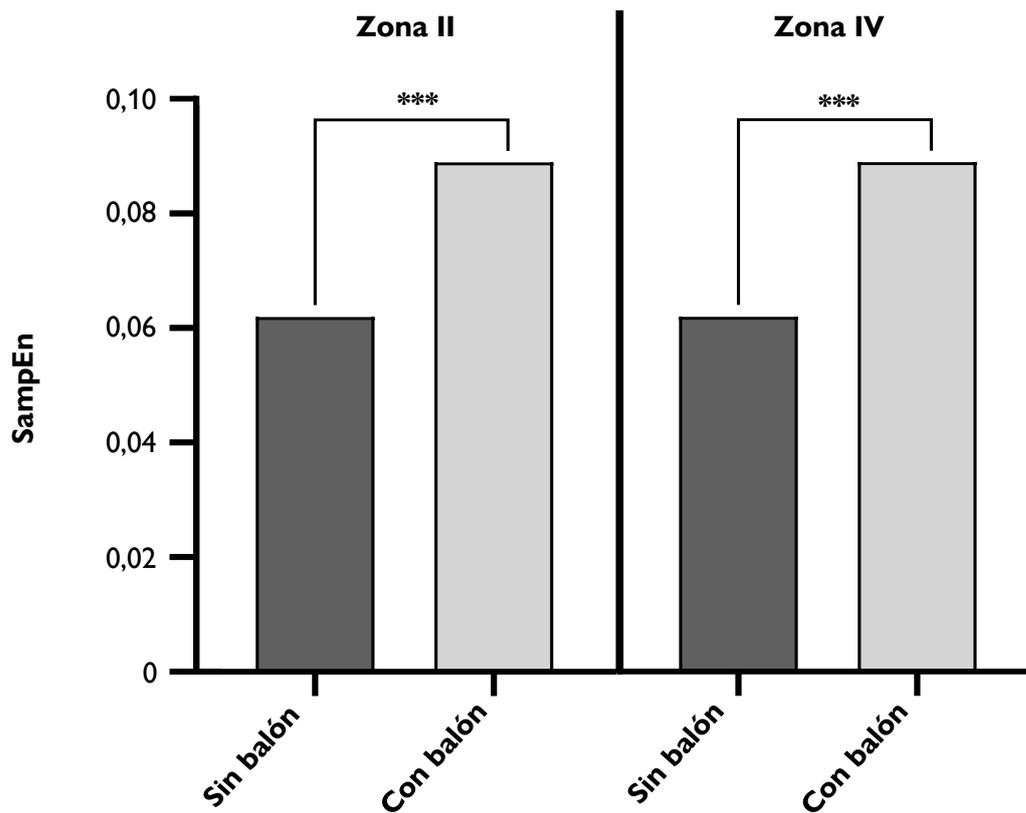


Figura 30. Diferencias observadas entre las variables con y sin balón y entre las zonas II y IV. Las diferencias de significación mostradas son \*\*\*  $p < 0,001$ .

### Modelización estadística de *SampEn*

Se muestran a continuación los resultados para el modelo estadístico ajustado, donde la variable *respuesta* corresponde a *SampEn* y como factores se han introducido el *tipo de ataque* y la *zona*. La interacción *Zona\*Tipo de Ataque* se ha eliminado del modelo por falta de significación. El factor *jugadora* se ha usado como factor aleatorio para identificar las medidas repetidas (diferentes series por jugadora en las diferentes zonas y para los diferentes tipos de ataque).

## Estimación de los efectos fijos del modelo

Tabla 27: Efectos de la variable en el modelo mixto para la entropía.

Variable en el modelo	Estimación (SE)	Valor t	P valor
Intersección	<b>0,0611</b> (0,0015)	40,86	<b>&lt; 0,001</b>
Tipo de ataque (Sin balón)			
Con balón	<b>0,0279</b> (0,0010)	29,21	<b>&lt; 0,001</b>
Zona (Zona IV)			
Zona II	0,0004 (0,0010)	0,41	0,680

Las categorías entre paréntesis corresponden a las categorías de referencia. Están destacados en negrita los valores estadísticamente significativos.

En este caso, realizar la CBR con balón incrementa en 0,0279 unidades la entropía *SampEn*. En el ataque sin balón, la entropía estimada es de 0,0611 pero, cuando el ataque se realiza con balón, esta entropía pasa a 0,089. Esta diferencia es estadísticamente significativa ( $p < 0,001$ ).

Por el contrario, en el caso de la variable *zona*, cuando el ataque se realiza desde la Zona II la entropía aumenta en 0,0004 unidades, un aumento pequeño y no significativo ( $p = 0,680$ ).

El test sobre los efectos fijos indica que el factor *tipo de ataque* es estadísticamente significativo, puesto que hay diferencias entre sus categorías ( $F_{(1, 334)} = 853,21$ ;  $p < 0,001$ ), y que el factor *zona* no es significativo, dado que no hay diferencias entre sus categorías ( $F_{(1, 334)} = 0,17$ ;  $p = 0,680$ ).

Como en todos los modelos anteriores, el efecto aleatorio *jugadora* es significativo ( $\chi^2 = 136,25$ ;  $p < 0,001$ ) y, por lo tanto, el modelo a utilizar es el modelo con efecto aleatorio.

## Discusión

El objetivo de este estudio fue analizar la variabilidad de la CBR realizada por los lados derecho e izquierdo del campo, con balón y sin el condicionante del balón.

Tal y como esperábamos, la variabilidad de la CBR, realizada sin balón por las zonas derecha e izquierda del campo fue similar al analizar a 48 jugadoras de diferentes categorías de un club de voleibol de élite.

Al formular la primera hipótesis de este estudio, preveíamos no encontrar diferencias en la variabilidad de la CBR sin el condicionante del balón al realizarse por ambas zonas del campo, a pesar de la diferente trayectoria que realizó la jugadora respecto a la red. Aunque el ángulo formado por la trayectoria de la jugadora respecto a la red durante la CBR, para una atacante diestra, es de entre 45-60° por la zona izquierda del campo y entre 60-90° por la zona derecha del campo (Bertucci et al., 1987), la cadencia de pasos y los apoyos son prácticamente los mismos. Cabe resaltar que en nuestro estudio todas las jugadoras eran diestras. La diferente trayectoria al realizar la CBR por los lados derecho e izquierdo del campo no ha sido suficiente para modificar la VM entre zonas, lo que demuestra la existencia de un PM estable (Zahálka et al., 2017). En el estudio de Caballero (2019) se observó que, en la carrera, el cambio de la rigidez del suelo aumentó la VM, mientras que la reducción de la vía para correr disminuyó su VM. En nuestro estudio, las condiciones de la rigidez del suelo y el espacio para realizar la CBR siempre fueron las mismas en las dos zonas del campo, lo que ayuda a entender la estabilidad de la VM, a pesar de cambiar de zona en el campo. No obstante, se encontraron amplias diferencias en la variabilidad de la CBR entre las jugadoras, pudiéndose comparar los registros de aquellas que se encontraban más alejadas de la media, con valores superiores e inferiores, lo que muestra la existencia de un perfil de rendimiento exclusivo, fruto de sus características morfológicas y su historial deportivo, que puede considerarse la firma o huella digital de cada una (Couceiro et al., 2013). En el ámbito de las ciencias del deporte, la relación entre rendimiento y VM se ha abordado especialmente en estudios sobre baloncesto, lanzamiento de dardos y tiro con pistola (Bartlett et al., 2007). Se ha podido evidenciar que los deportistas, sobre todo los expertos, presentan una alta reproducibilidad al repetir un mismo movimiento (Davids et al., 2008) por lo que, a veces, se utiliza este parámetro como un indicador de rendimiento deportivo (Baudry et al., 2009). Aumentar el rendimiento en cualquier actividad deportiva supondría reducir la variabilidad en las acciones por lo que una alta variabilidad motora, que podría ser beneficiosa y

necesaria para el desarrollo motor y el aprendizaje de nuevas habilidades motoras, podría ser perjudicial para un desempeño experto (Dhawale et al., 2017). En general, los deportistas consiguen reducir la variabilidad de sus movimientos deportivos a través de la práctica (Bartlett et al., 2007) y, en este sentido, podríamos afirmar que la CBR es un movimiento que se repite multitud de veces en los entrenamientos y competiciones, hasta 40 000 veces en una temporada para jugadoras especialistas (Kugler et al., 1996), lo que probablemente acentúe este proceso adaptativo. Sabemos que la variabilidad óptima se encuentra entre dos límites (Stergiou et al., 2006): una excesiva variabilidad implica que el sistema es demasiado inestable y sensible a las perturbaciones; en cambio, poca variabilidad indica que el sistema demasiado estereotipado, que es menos probable que exhiba un comportamiento exploratorio y que, por lo tanto, sea menos capaz de adaptarse a las perturbaciones. En relación con lo expuesto, los resultados obtenidos en nuestro estudio evidenciaron que la CBR presentó un comportamiento poco exploratorio, atendiendo a la similitud de los valores de variabilidad encontrados entre zonas y a su pequeño coeficiente de variabilidad con y sin balón (14,3% y 13,9% respectivamente), lo que significaría que el PM presentó poca variabilidad.

Sorprendentemente, la incorporación del balón como condicionante y los movimientos del brazo de golpeo antes, durante y después del contacto con el balón no fueron suficientes para modificar la VM entre las dos zonas del campo analizadas, refutando la segunda hipótesis formulada. En un estudio sobre golf, en el que también se utilizó el cálculo de entropía (Couceiro et al., 2014), se encontraron diferencias en la VM al comparar la realización del *putt* de golf desde la derecha y desde la izquierda del hoyo, con ángulos de 25°, en deportistas experimentados. Al realizar el *putt* por las zonas derecha e izquierda del hoyo, con un mismo ángulo de 25° y con la misma pendiente a superar, ocurrió que la trayectoria trazada por la bola en los dos casos era diferente para el golfista diestro. Con la misma orientación hacia el hoyo por la parte izquierda se trazaba una trayectoria lineal, mientras que por la parte derecha debía haber una trayectoria curva lo que aumentó la variabilidad de ese *putt* respecto al realizado desde la izquierda. En nuestro estudio preveíamos una mayor variabilidad de la CBR con el condicionante del balón por la parte derecha del campo, atendiendo a la diferente posición del brazo de golpeo del atacante respecto a la trayectoria del balón. A una jugadora diestra, atacando por la zona izquierda, el balón se le acerca por el lado del brazo de golpeo, mientras que por el lado derecho el brazo de golpeo está en el lado contrario. Por otro lado, deberíamos considerar la CBR con balón como una interceptación de un objeto en movimiento, por lo que la percepción visual

sería uno de los factores determinantes para captar información relevante del entorno, como la posición del objeto en el espacio, la dirección y la velocidad de desplazamiento del objeto y la aceleración o desaceleración del objeto en el recorrido de su trayectoria (Nettleton, 1979; Whiting, 1969). Cuando se realizó la CBR con balón por la parte derecha del campo, el colocador estaba de espaldas a la rematadora (orientado hacia zona IV), lo que podía entorpecer la percepción visual y, consecuentemente, limitar la capacidad de captar información relevante para poder ajustar la CBR de forma anticipada a la trayectoria del balón. Concretamente, pudo afectar a la visión del ángulo de entrada del balón en las manos del colocador, la posición de sus muñecas en el momento de la colocación y el ángulo de salida del balón. *A priori*, estas limitaciones en la captación de información tenían que ser suficientes para aumentar la VM en comparación con el lado izquierdo del campo por el que, supuestamente, existirían menos limitaciones para que las jugadoras puedan captar información relevante para anticipar la CBR. Los resultados obtenidos evidenciaron que la VM de la CBR no se vio afectada por la diferente posición del brazo de golpeo de la atacante respecto a la trayectoria del balón ni por las diferencias en la captación de información relevante de la colocación.

La gran similitud encontrada en la variabilidad de la CBR entre zonas realizada con balón (*effect size* 0,013378) también podría atribuirse, en parte, a que el contacto con el balón debió realizarse, en ambas zonas, enfrente de la rematadora, preferentemente cerca del centro de la parte superior de la cabeza, en una posición comprendida entre el hombro y lo alto de la cabeza, evitando en lo posible que el contacto se realizara por fuera de la línea del eje corporal (Bertucci et al., 1987; Chung, 1988; Selinger & Ackerman, 1987). Cuando las jugadoras contactan con el balón por fuera de la línea corporal tienen muchas dificultades para controlarlo e incluso pasar el balón por encima de la red, por la menor altura alcanzada en el punto de impacto (Bertucci et al., 1987; Selinger & Ackerman, 1987). La propia red como condicionante podría, en cierta manera, forzar a las jugadoras a una mayor regularidad en la realización de la CBR con balón por ambos lados de la red ya que el hecho de tener que alcanzar una altura de golpeo óptima para la superación de la red forzaría un PM de la CBR relativamente estable, en el que el armado del brazo redujera los grados de libertad de su articulación (Tözeren, 2000). Los golpes del balón por fuera del eje corporal, que probablemente hubiesen aumentado la VM, no fueron analizados, pues la mayoría correspondían a remates a la red o fuera de los límites del campo.

La colocación fue realizada a partir de un autolanzamiento por un colocador con más de 20 años de experiencia situado en zona III del campo, pegado a la red y orientado hacia zona IV. Aunque el colocador intentó repetir exactamente la misma colocación hacia las rematadoras, la inevitable variabilidad en la trayectoria del balón, fruto de la propia variabilidad humana (Couceiro et al., 2014), tampoco afectó a la VM de la CBR entre zonas. Las diferencias en la trayectoria de la colocación podrían resolverse modificando la cadencia de los pasos de la CBR o simplemente adelantando o retrasando el momento de iniciarla. En el segundo caso sería menos probable que se pudiera apreciar una modificación substancial en la VM, del mismo modo que si se hubiese realizado la CBR para golpear un balón colgado en el punto más alto de golpeo de la jugadora (Fuchs, Menzel, et al., 2019a).

Como se esperaba, la variabilidad de la CBR con balón fue más alta que sin el condicionante del balón, corroborando la tercera hipótesis de este estudio. Una de las explicaciones a esta mayor variabilidad sería que cuando se rematara un balón en una situación de juego, deberían realizarse ajustes en la amplitud de los pasos de la CBR, en el tiempo de reacción y en la trayectoria hacia el balón (Wagner et al., 2009) que no serían forzados al realizarse sin el condicionante del balón. Además, cuando los deportistas deberían ajustar una acción motriz a un objeto en movimiento, la lectura de la trayectoria se ve dificultada cuando el sujeto está en movimiento o realizando simultáneamente una acción diferente (Sillero, 2002). En un experimento en el que se debían interceptar pelotas que caían por una rampa mientras se iba montado en una bicicleta, los sujetos fallaron en el 85% de los intentos (Lenoir et al., 1999). El sujeto tendría que dividir su atención entre dos acciones distintas, disminuyendo la eficiencia en la tarea. Por esta razón, probablemente en nuestro estudio las jugadoras mostraran una menor eficiencia y, consecuentemente, una mayor variabilidad en sus movimientos cuando realizaban la CBR con el condicionante del balón.

Moras et al. (2018), al analizar la VM durante la realización de un ejercicio de fuerza en patea cónica, consistente en desplazarse hacia adelante y atrás sin y con el condicionante del balón, pudieron apreciar un aumento de la VM en la modalidad con balón. Aunque el movimiento analizado y el contexto en el que se realizó el ejercicio es muy diferente en este estudio, la posición del acelerómetro y los cálculos para obtener los valores de entropía fueron prácticamente iguales, lo que permitiría considerar que la incorporación del balón a una tarea

aumenta su dificultad porque implica una reducción de la reproducibilidad del sistema somatosensorial de información (Kudo, 2008) y su complejidad.

En resumen, los resultados obtenidos en este estudio evidenciaron que la organización secuencial de movimientos estructurados que configuraron la CBR constituirían una rutina o secuencia poco moldeable que presentaría una elevada resistencia al cambio. Futuros estudios deberían analizar cómo pueden afectar los condicionantes del bloqueo y el nivel competitivo a la VM de la CBR, así como la afectación de los diferentes tipos de suelo sobre los que se suele entrenar y competir.

## **Conclusiones**

La variabilidad de la CBR con el condicionante del balón es similar al realizarse por las partes derecha e izquierda del campo.

La variabilidad de la CBR sin el condicionante del balón es similar al realizarse por las partes derecha e izquierda del campo.

La variabilidad de la CBR con el condicionante del balón es más alta que sin el condicionante del balón.

**8.4. Estudio 3: Análisis de la variabilidad de la carrera batida de remate en las diferentes categorías del voleibol (*infantil, cadete, juvenil, sénior*) y en los roles específicos del juego (*colocadora, punta, central, líbero*), en un club de élite**



## Objetivo principal

Análisis de la variabilidad de la CBR entre las diferentes categorías del voleibol (*infantil, cadete, juvenil, sénior*) y entre los roles específicos del juego (*colocadora, punta, central, líbero*), en un club de élite.

## Hipótesis

H<sub>1</sub>: La variabilidad de la CBR con el condicionante del balón será más alta en las categorías inferiores, decreciendo de forma progresiva hasta la máxima categoría.

H<sub>2</sub>: La variabilidad de la CBR con el condicionante del balón será más baja en las jugadoras de posición punta.

## Análisis de datos

Para el análisis de los datos se empleó, primeramente, el *software* específico del WIMU (Spro WIMU, Realtrack Systems, Almería, España), de donde se obtuvo la señal cruda y se realizó un primer análisis visual de la señal para comprobar su nitidez. Se calculó la aceleración total (*a<sub>t</sub>*) usando la suma de vectores en tres dimensiones: vertical (*z*), anteroposterior (*y*) y mediolateral (*x*). Se aplicaron cortes a la señal por cada repetición de la CBR desde el inicio (*a1*) hasta el final (*a5*), obteniendo un total de 384 señales de los bloques de 6 CBR. Estas señales fueron exportadas al *software* Excel, en el cual se calculó la entropía muestral (*SampEn*) para cada señal, según Goldberger et al. (2000), mediante rutinas dedicadas programadas en Matlab® (The MathWorks, Massachussets, USA).

## Análisis estadístico

En primer lugar, se realizó la estadística descriptiva para las variables *respuesta de interés* (*SampEn*) con los estadísticos de *resumen media, desviación estándar* (DE) e *intervalo de confianza al 95% para la media* (IC 95%) para cada grupo de la variable explicativa principal, *tipo de ataque*, y también a nivel global.

Para evaluar si existen diferencias en la variable *respuesta entropía* debidas al tipo de ataque se analizó la variable *respuesta SampEn* mediante un Modelo Lineal Mixto, teniendo en cuenta la variable explicativa principal, *tipo de ataque* (con y sin balón), y las variables explicativas secundarias *categoría* (*infantil, cadete, juvenil y sénior*) y *posición* (*punta, central, colocadora, líbero*) como factores fijos, así como sus interacciones. La variable *jugadora* se ha introducido como un

factor aleatorio para controlar la variabilidad de la jugadora (medida repetida). También se introduce la interacción *jugadora por tipo de ataque* (Jugadora\* Tipo de Ataque) como efecto aleatorio a fin de controlar la variabilidad individual de la jugadora por tipo de ataque.

En caso de obtener un resultado significativo, se han realizado los contrastes 2 a 2 *a posteriori*. Para poder corregir el error de tipo I en los contrastes múltiples, los p-valores obtenidos se han corregido mediante la corrección de Tukey.

Todos los modelos implementados se han llevado a cabo con el *software* IBM® SPSS® Statistics v25. Las decisiones estadísticas se han realizado tomando como nivel de significación el valor 0,05.

## Resultados

En el estudio 3, los resultados de las características de las jugadoras fueron analizados por categoría (Tabla 28) y por posición (Tabla 29).

Tabla 28. Valores  $\pm$  DE de los descriptivos de las características de las jugadoras por categoría.

<b>Categoría</b>	<b>n</b>	<b>Edad (años)</b>	<b>Altura (m)</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Experiencia (años)</b>
Infantil	12	13,83 $\pm$ 0,39	1,73 $\pm$ 0,05	57,18 $\pm$ 5,74	4,33 $\pm$ 0,98
Cadete	12	15,67 $\pm$ 0,49	1,77 $\pm$ 0,04	65,06 $\pm$ 3,69	6,08 $\pm$ 1,24
Juvenil	12	18,08 $\pm$ 0,79	1,79 $\pm$ 0,05	69,90 $\pm$ 6,40	8,58 $\pm$ 2,39
Sénior	12	22,67 $\pm$ 2,53	1,81 $\pm$ 0,05	73,99 $\pm$ 6,15	12,92 $\pm$ 3,42

n = número de jugadoras; m= metros; kg= kilogramos.

Tabla 29. Valores  $\pm$  DE de los descriptivos de las características de las jugadoras por posición (*puntas, líberos, centrales y colocadoras*).

Posición	n	Edad (años)	Altura (m)	Peso (kg)	Experiencia voleibol (años)	Experiencia posición (años)
Puntas	24	16,83 $\pm$ 3,62	1,76 $\pm$ 0,06	65,95 $\pm$ 7,15	7,50 $\pm$ 3,73	4,92 $\pm$ 2,28
Líberos	5	19,80 $\pm$ 3,37	1,71 $\pm$ 0,04	63,88 $\pm$ 5,39	11,40 $\pm$ 3,61	4,80 $\pm$ 2,40
Centrales	12	18,42 $\pm$ 3,40	1,82 $\pm$ 0,03	72,57 $\pm$ 6,39	7,17 $\pm$ 3,54	5,08 $\pm$ 2,61
Colocadoras	7	17,00 $\pm$ 3,51	1,77 $\pm$ 0,02	68,67 $\pm$ 5,03	8,57 $\pm$ 4,50	4,86 $\pm$ 2,19

n = número de jugadoras; m= metros; kg= kilogramos.

### Influencia de la categoría

En la tabla 30, los resultados descriptivos nos apuntan que hay una igualdad en los valores entre todas las categorías excepto la *infantil*, que presenta valores más altos.

Tabla 30. Estadísticos descriptivos de las variables *SampEn* (a.u.) con el condicionante de la categoría de juego por edad.

	n	Media	Mediana	DE	Max	Min	Inferior CL 95%	Superior CL 95%	CV %
Global	384	0,075	0,073	0,019	0,127	0,035	0,073	0,077	25,333
Infantil	96	0,080	0,078	0,016	0,118	0,054	0,077	0,083	20,000
Cadete	96	0,074	0,070	0,019	0,127	0,036	0,070	0,077	25,676
Juvenil	96	0,074	0,074	0,018	0,114	0,039	0,070	0,077	24,324
Sénior	96	0,074	0,069	0,021	0,126	0,035	0,069	0,078	28,378

n = número de repeticiones de bloques; DE = desviación estándar; CL = límite de confianza; CV = coeficiente de variación.

En la figura 31 observamos cómo los valores de *SampEn* son más altos en la categoría *infantil* y luego se estabilizan.

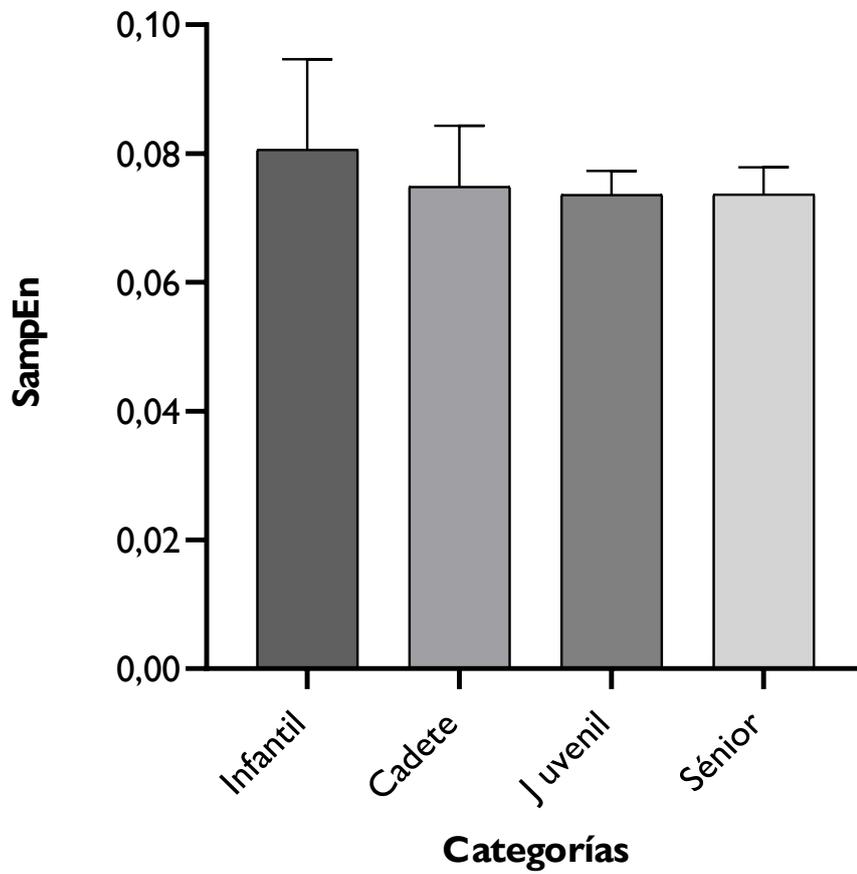


Figura 31. Valores de las medias de la *SampEn* en la CBR por categorías.

Asimismo, en la figura 32 podemos observar que las jugadoras que pertenecen a una misma categoría (mismo color) tienen un comportamiento muy diferente las unas respecto a las otras, exceptuando a las jugadoras de la categoría *infantil*.

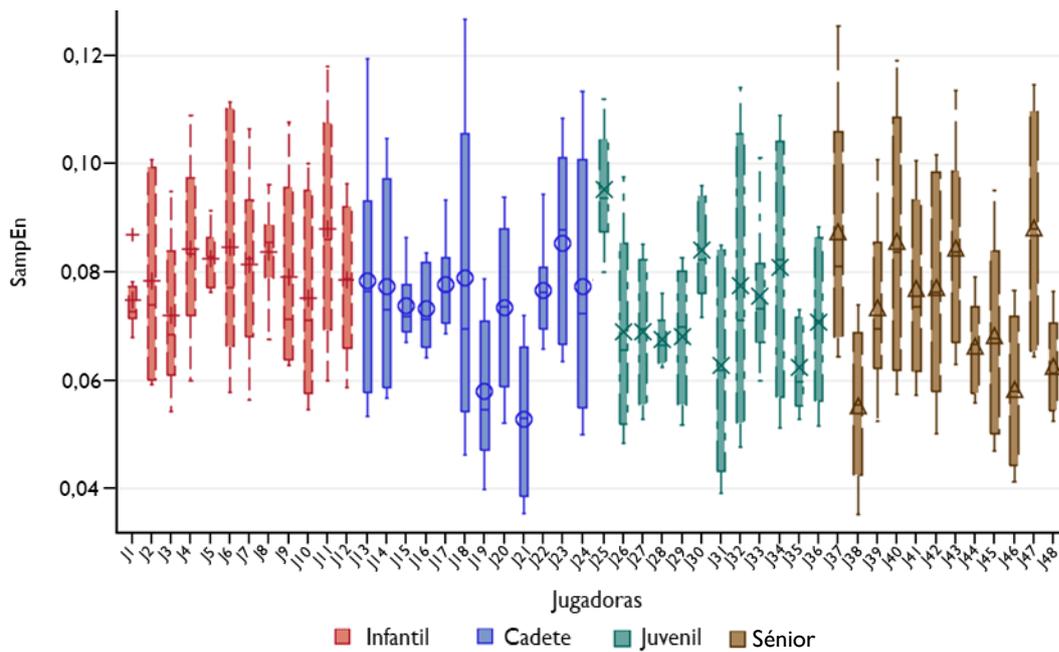


Figura 32. Diagrama de caja por categoría y jugadora con los valores de *SampEn* de la CBR.

### Modelización estadística de *SampEn* con el factor *categoría*

Se realizan dos modelos estadísticos incorporando el factor *categoría*, considerando los dos enfoques anteriores:

- *Categoría* como factor fijo: se introduce en el modelo como un factor fijo, así como sus interacciones con el resto de factores (*tipo de ataque*).
- *Categoría* como componente de la varianza: se introduce como factor fijo, pero también como componente de la varianza residual. Es decir, se asume que la variabilidad de las categorías no es la misma. Se realiza el test de varianzas homogéneas para validar esta hipótesis.

## Modelo1: Categoría como factor fijo e interacción.

Tabla 31. Estimación de los efectos fijos del modelo

Efecto	Tipo de ataque	Categoría	Estimación	DE	Estadístico t	Probt
<i>Intersección</i>	-	-	<b>0,0576</b>	0,0028	2,38	<b>&lt;,0001</b>
Tipo de Ataque	Con balón	-	<b>0,0316</b>	0,0019	16,64	<b>&lt;,0001</b>
Tipo de Ataque	Sin balón	-	0	-	-	-
Categoría	-	Infantil	<b>0,0097</b>	0,0039	2,45	<b>0,0174</b>
Categoría	-	Cadete	0,0019	0,0039	0,48	0,6334
Categoría	-	Juvenil	0,0023	0,0039	0,59	0,5583
Categoría	-	Sénior	0	-	-	-
Tipo de Ataque * Categoría	Con balón	Infantil	<b>-0,0063</b>	0,0027	-2,33	<b>0,0206</b>
Tipo de Ataque * Categoría	Con balón	Cadete	-0,0039	0,0027	-1,46	0,1452
Tipo de Ataque * Categoría	Con balón	Juvenil	-0,0048	0,0027	-1,79	0,0748
Tipo de Ataque * Categoría	Con balón	Sénior	0	-	-	-
Tipo de Ataque * Categoría	Sin balón	Infantil	0	-	-	-
Tipo de Ataque * Categoría	Sin balón	Cadete	0	-	-	-
Tipo de Ataque * Categoría	Sin balón	Juvenil	0	-	-	-
Tipo de Ataque * Categoría	Sin balón	Sénior	0	-	-	-

Destacamos **en negrita** los valores significativos; DE= Desviación estándar.

Hay diferencias entre los tipos de ataque, en función de si ha sido efectuado con balón o sin. Se observa que la categoría *infantil* aumenta en 0,0097 unidades la entropía respecto al grupo *sénior*, al que le corresponde una entropía de 0,0577. Este aumento es estadísticamente significativo ( $p = 0,0174$ ). Además, en esta categoría, cuando el ataque se realiza con balón, la entropía baja en -0,0063 unidades respecto a la categoría *sénior* con balón.

Respecto al test para evaluar la significación de cada factor, el tipo de ataque es estadísticamente significativo ( $p < 0,001$ ), pero no así la categoría ( $p = 0,2076$ ).

A pesar de que la interacción entre *tipo de ataque* y *categoría* no ha resultado significativa ( $p = 0,1166$ ), se ha considerado interesante mantenerla para estudiar los efectos desglosados.

### Interacción: comparación del tipo de ataque por categoría

Tabla 32. Valores de la comparación de la interacción entre las variables *tipo de ataque* y *categoría*.

	Tipo de ataque	Tipo de ataque	Estimación	Estadístico t	Adj P*
Categoría Infantil	Con balón	Sin balón	<b>0,0254</b>	13,35	< ,0001
Categoría Cadete	Con balón	Sin balón	<b>0,0277</b>	14,57	< ,0001
Categoría Juvenil	Con balón	Sin balón	<b>0,0268</b>	14,11	< ,0001
Categoría Sénior	Con balón	Sin balón	<b>0,0316</b>	16,64	< ,0001

Adj P\*= valores corregidos. Ajuste aplicado de Tukey; Destacamos **en negrita** los valores significativos.

Como se había observado en la tabla de estimación de los efectos fijos del modelo, hay diferencias significativas al 10% entre las categorías *infantil* y *sénior* cuando el ataque se realiza sin balón. Al aplicar la corrección por multiplicidad de contrastes de Tukey, se ha perdido la significación del 5% a pesar de que, como se ha mencionado, sí son significativas al 10%.

Parece ser que el factor *categoría* aislado no es relevante a la hora de explicar la *SampEn*.

En el test sobre el factor aleatorio del modelo, el efecto de la jugadora es significativo ( $p < 0,0001$ ). En la estimación de los efectos aleatorios del modelo se observan jugadoras por encima y por debajo de la media estimada, por lo que queda descartado que este hecho sea debido al factor *categoría*.

### Interacción Tipo de Ataque\* Categoría: comparación por categorías dentro de tipo de ataque

Tabla 33. Valores de la comparación de la interacción entre las variables *categoría* y *tipo de ataque*.

	Categoría	Categoría	Estimación	Estadístico t	Adj P*
Tipo de ataque con balón	Cadete	Infantil	0,0096	2,10	0,0549
Tipo de ataque con balón	Cadete	Juvenil	0,0017	0,50	0,9594
Tipo de ataque con balón	Cadete	Sénior	0,0001	0,05	0,9999
Tipo de ataque con balón	Infantil	Juvenil	0,0094	2,55	0,0541
Tipo de ataque con balón	Infantil	Sénior	0,0098	2,10	0,0510
Tipo de ataque con balón	Juvenil	Sénior	-0,0016	-0,44	0,9708
Tipo de ataque sin balón	Cadete	Infantil	-0,0090	-2,49	0,0634
Tipo de ataque sin balón	Cadete	Juvenil	0,0002	0,05	1,0000
Tipo de ataque sin balón	Cadete	Sénior	0,0027	0,76	0,8720
Tipo de ataque sin balón	Infantil	Juvenil	0,0092	2,50	0,0623
Tipo de ataque Sin balón	Infantil	Senior	0,0118	3,17	0,0091
Tipo de ataque Sin balón	Juvenil	Senior	0,0026	0,71	0,8916

Adj P\*= valores corregidos. Ajuste aplicado de Tukey; Azul = interacciones significativas al 10%; Rojo = interacciones significativas al 5%.

Según el tipo de ataque se observan diferencias entre las categorías *infantil* y *sénior* cuando el ataque se realiza sin balón, 0,0118 unidades ( $p = 0,0091$ ) en una significación del 5%. Aunque no son significativas al 5%, cuando observamos significaciones al 10% también hay diferencias entre *infantil* y *sénior* con balón, 0,0098 unidades ( $p = 0,0510$ ). Entre *infantil* y *cadete*, con y sin balón, 0,0096 y -0,0090 unidades respectivamente ( $p = 0,0549$ ). Mientras que entre *infantil* y *juvenil* también encontramos significación al 10%, con y sin balón, 0,0094 y 0,0092 unidades para cada interacción ( $p = 0,0541$  y  $p = 0,0623$ ). La categoría *infantil* muestra diferencias con el resto de las categorías en ambos tipos de ataque (Figura 33).

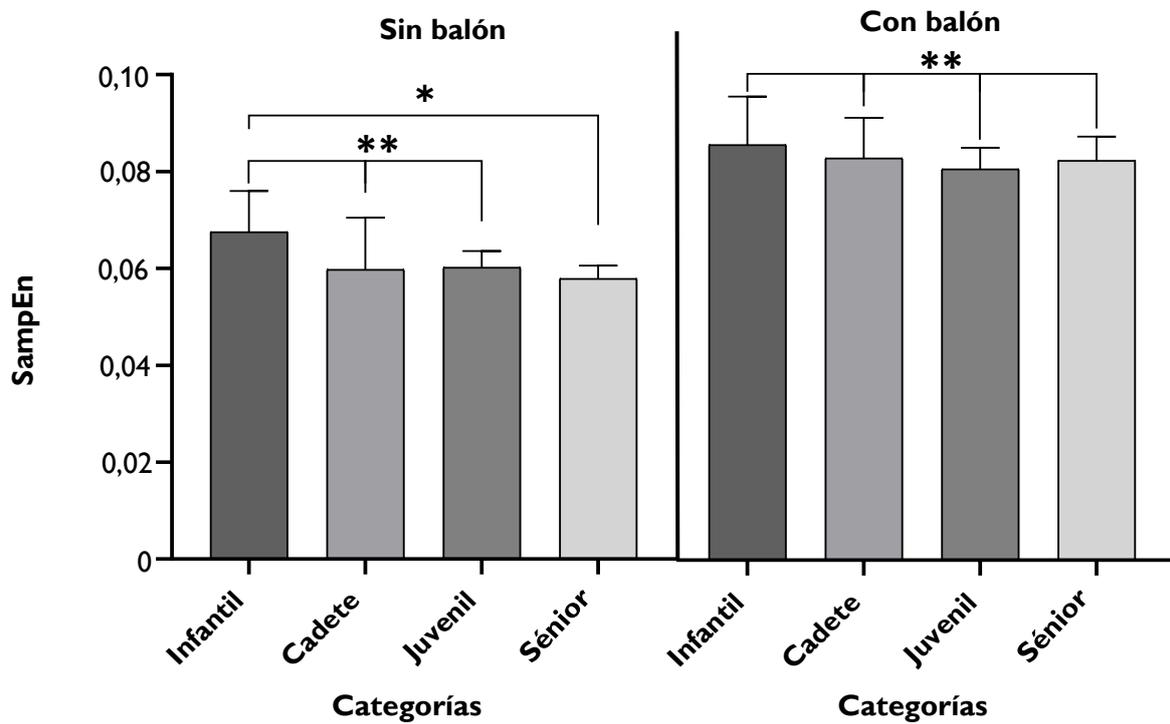


Figura 33. Interacciones entre categorías por el tipo de ataque. Las diferencias de significación mostradas son \*  $p < 0,05$  y \*\*  $p < 0,1$ .

### Modelo 2: Categoría como factor fijo y componente de la varianza residual

El otro enfoque que se le debe dar al factor *categoría* consiste en considerar su intervención en la variabilidad residual, en vez de tratarlo únicamente como un factor fijo. En este caso, se elimina la interacción del modelo que se ha visto anteriormente, ya que tan solo implica diferencias entre tipos de ataque por categorías, y se introduce como un factor explicativo de la variabilidad. Esto puede ayudar a reducir las diferencias individuales observadas entre jugadoras.

Tabla 34. Valores de la estimación de los efectos fijos del modelo.

Efecto	Tipo de ataque	Categoría	Estimación	DE	Estadístico t	Probt
Intersección	-	-	0,05930	0,0027	22,12	<,0001
Tipo de ataque	Con balón	-	<b>0,02820</b>	0,0009	30,07	<b>&lt;,0001</b>
Tipo de ataque	Sin balón	-	0	-	-	-
Categoría	-	Cadete	-0,00007	0,0037	-0,02	0,9852
Categoría	-	Infantil	0,00650	0,0037	1,76	0,0849
Categoría	-	Juvenil	-0,00008	0,0037	-0,02	0,9832
Categoría	-	Sénior	0	-	-	-

Destacamos **en negrita** los valores significativos; DE= Desviación estándar.

Respecto a la estimación del efecto, únicamente el factor *tipo de ataque* es significativo ( $p < 0,0001$ ). Cuando el ataque se realiza con balón, la entropía aumenta 0,0282 unidades respecto a un ataque sin balón. En el factor *categoría* no se detecta ahora ninguna categoría significativa.

En el test global sobre los efectos fijos del modelo, únicamente el factor *tipo de ataque* es significativo ( $p < 0,0001$ ). En el test sobre los factores aleatorios del modelo hay dos fuentes de aleatoriedad, la de la jugadora y la debida a la categoría. En este caso, solo el efecto de la jugadora es significativo. Ahora no hay un efecto *categoría* ya que, a pesar de que los valores de variabilidad son más pequeños en la categoría *sénior*, se pueden considerar todas iguales.

En cuanto al test sobre los sujetos aleatorios del modelo, hay pocas jugadoras con un efecto significativo, produciendo valores de *SampEn* más estables o similares entre ellos.

### Influencia de la posición

En la tabla 35, los resultados descriptivos apuntan a que los valores más bajos se encuentran en la posición de juego punta.

Tabla 35. Estadísticos descriptivos de las variables *SampEn* (a.u.) con el condicionante *posición de juego*.

	<b>n</b>	<b>Media</b>	<b>Mediana</b>	<b>DE</b>	<b>Max</b>	<b>Min</b>	<b>Inferior CL 95%</b>	<b>Superior CL 95%</b>	<b>CV %</b>
Global	384	0,075	0,073	0,019	0,127	0,035	0,073	0,077	25,333
Central	96	0,079	0,076	0,019	0,120	0,050	0,076	0,083	24,051
Colocadora	56	0,074	0,073	0,016	0,114	0,039	0,070	0,078	21,622
Líbero	40	0,081	0,077	0,022	0,127	0,046	0,074	0,088	27,160
Punta	192	0,072	0,069	0,019	0,118	0,035	0,070	0,075	26,389

n = número de repeticiones de bloques; DE = desviación estándar; CL = límite de confianza; CV = coeficiente de variación.

En la figura 34 observamos cómo los valores más bajos se encuentran en la posición punta, cerca de los valores de la posición colocadora.

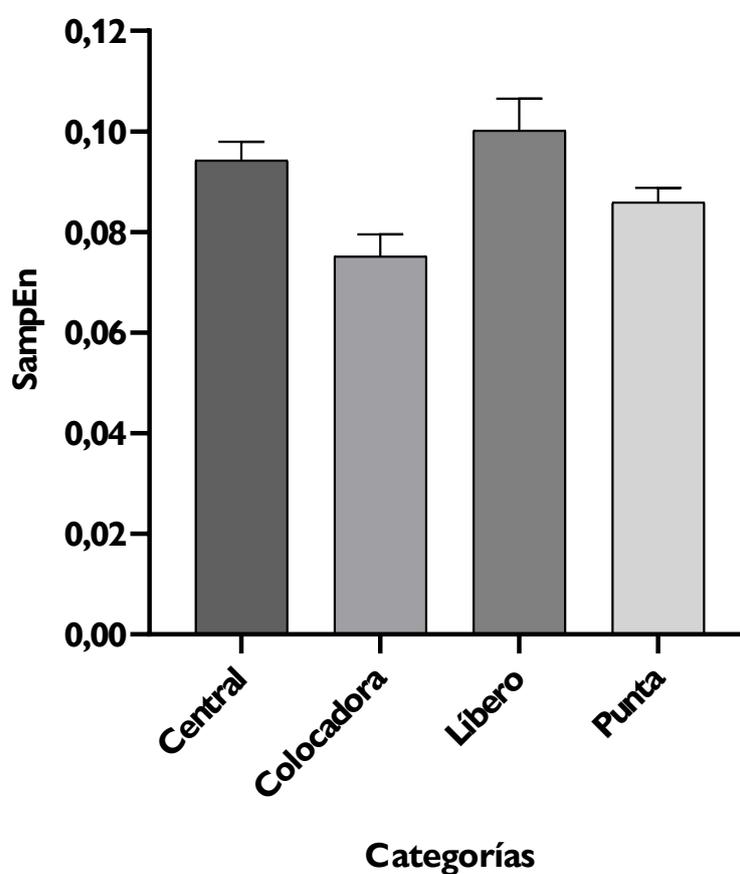


Figura 34. Valores de las medias de la *SampEn* en la CBR por posición en el juego.

En el diagrama de caja por jugadora, identificada según su posición de juego (Figura 35), no se observan grandes diferencias entre las jugadoras de las cuatro posiciones, siendo la posición punta la que presenta más variabilidad entre las jugadoras y también una entropía más pequeña.

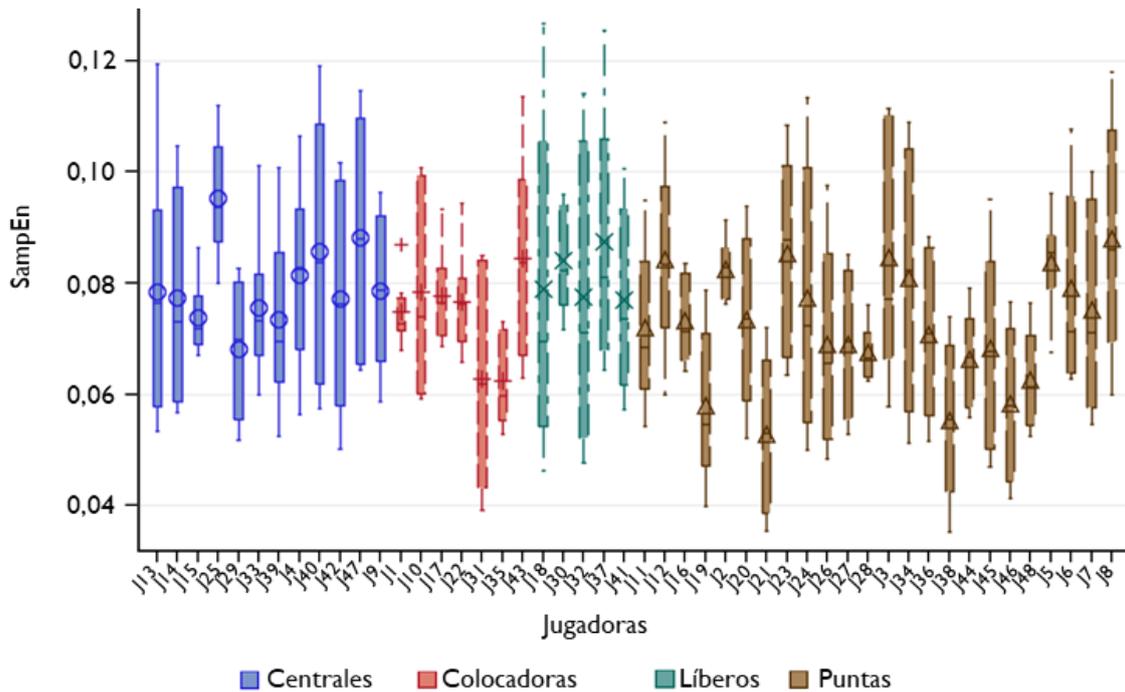


Figura 35. Diagrama de caja con los valores de media  $\pm$  DE por posiciones de juego por cada jugadora.

### Modelo con posición e interacciones

Las diferencias para la *SampEn*, con y sin balón, son más evidentes que entre posiciones o entre categorías (Figura 33). En la tabla 36 observamos, respecto a la estimación de los efectos del modelo, cómo el hecho de realizar el ataque con balón incrementa en 0,0298 unidades la *SampEn*. Por otro lado, el hecho de pertenecer a la categoría *infantil* incrementa en 0,0118 unidades la *SampEn* respecto a al grupo *sénior*. Si la posición que ocupa la jugadora es central, la *SampEn* aumenta en 0,0075 unidades respecto a la posición de punta.

Tabla 36. Estimación de los efectos fijos del modelo.

Efecto	Tipo de ataque	Categoría	Posición	Estimación	DE	Estadístico t	Probt
Intersección	-	-	-	<b>0,0536</b>	0,0030	17,75	<b>&lt;,0001</b>
Tipo de Ataque	Con balón	-	-	<b>0,0298</b>	0,0022	13,58	<b>&lt;,0001</b>
Tipo de Ataque	Sin balón	-	-	0	-	-	-
Categoría	-	Cadete	-	0,0028	0,0036	0,76	0,4500
Categoría	-	Infantil	-	<b>0,0118</b>	0,0037	3,17	<b>0,0025</b>
Categoría	-	Juvenil	-	0,0026	0,0036	0,71	0,4784
Categoría	-	Sénior	-	0	-	-	-
Posición	-	-	Central	<b>0,0075</b>	0,0032	2,38	<b>0,0210</b>
Posición	-	-	Colocadora	0,0045	0,0038	1,19	0,2380
Posición	-	-	Líbero	0,0074	0,0045	1,66	0,1036
Posición	-	-	Punta	0	-	-	-
Tipo de Ataque* Posición	Con balón	-	Central	0,0022	0,0023	0,96	0,3367
Tipo de Ataque* Posición	Con balón	-	Colocadora	<b>-0,0054</b>	0,0028	-1,92	<b>0,0560</b>
Tipo de Ataque* Posición	Con balón	-	Líbero	0,0088	0,0033	2,67	0,0079
Tipo de Ataque* Posición	Con balón	-	Punta	0	-	-	-
Tipo de Ataque* Posición	Sin balón	-	Central	0	-	-	-
Tipo de Ataque* Posición	Sin balón	-	Colocadora	0	-	-	-
Tipo de Ataque* Posición	Sin balón	-	Líbero	0	-	-	-
Tipo de Ataque* Posición	Sin balón	-	Punta	0	-	-	-

Destacamos **en negrita** los valores significativos; DE= Desviación estándar.

El test global sobre los efectos fijos del modelo nos muestra que, para los valores de *SampEn*, además del factor *tipo de ataque* ( $p < 0,0001$ ), son también significativos los factores *categoría* ( $p = 0,0224$ ), *posición* ( $p = 0,0082$ ) y la interacción Tipo de Ataque\*Posición ( $p = 0,0032$ ).

No es significativa la interacción entre *tipo de ataque* y *categoría*.

En la interacción Tipo de Ataque \* Posición, encontramos que para cada posición hay diferencias según el tipo de ataque. Estas son más grandes en la posición líbero, 0,0359 unidades, y más pequeñas en la posición colocadora, 0,0218.

**Interacción Tipo de Ataque\* Categoría: comparación de las posiciones dentro de tipo de ataque.**

Tabla 37. Valores de la comparación de la interacción entre las variables *tipo de ataque* y *posición*.

	Posición	Posición	Estimación	Valor t	Adj P*
<b>Tipo de ataque con balón</b>	<b>Central</b>	<b>Colocadora</b>	0,0106	2,51	<b>0,0609</b>
Tipo de ataque con balón	Central	Libero	-0,0065	-1,37	0,5210
<b>Tipo de ataque con balón</b>	<b>Central</b>	<b>Punta</b>	<b>0,0097</b>	3,09	<b>0,0117</b>
<b>Tipo de ataque con balón</b>	<b>Colocadora</b>	<b>Libero</b>	-0,0170	-3,24	<b>0,0072</b>
Tipo de ataque con balón	Colocadora	Punta	-0,0008	-0,22	0,9962
<b>Tipo de ataque con balón</b>	<b>Libero</b>	<b>Punta</b>	<b>0,0162</b>	3,62	<b>0,0019</b>
Tipo de ataque sin balón	Central	Colocadora	0,0029	0,71	0,8940
Tipo de ataque sin balón	Central	Libero	0,0001	0,02	1,0000
Tipo de ataque sin balón	Central	Punta	0,0075	2,38	0,0835
Tipo de ataque sin balón	Colocadora	Libero	-0,0029	-0,55	0,9472
Tipo de ataque sin balón	Colocadora	Punta	0,0045	1,19	0,6317
Tipo de ataque sin balón	Libero	Punta	0,0074	1,66	0,3492

Adj P\*= valores corregidos. Ajuste aplicado de Tukey; Azul = interacciones significativas al 10%; Rojo = interacciones significativas al 5%.

Según el tipo de ataque, no se detecta ninguna diferencia significativa entre las posiciones que ocupan las jugadoras cuando el ataque se realiza sin balón.

Si el ataque se realiza con balón, existen diferencias estadísticas significativas entre las posiciones:

- Central y punta, de 0,009 unidades de entropía *SampEn*; es decir, la central tiene una entropía 0,009 unidades superior a la punta ( $p = 0,0117$ ),

- Líbero y punta, de 0,0162; la líbero tiene una entropía 0,0162 unidades superior a la entropía de la punta ( $p = 0,0019$ ).
- Colocadora y líbero, de -0,017 unidades; es decir, la líbero tiene una entropía 0,017 unidades superior a la entropía *SampEn* de la colocadora ( $p = 0,0072$ ).

Finalmente, existe una diferencia estadística al nivel del 10% entre la entropía *SampEn* de la central y la entropía *SampEn* de la colocadora de 0,0106 unidades ( $p = 0,0609$ ).

En este sentido, se observa cómo los valores más bajos de *SampEn* de la posición punta muestran diferencias significativas respecto a las posiciones central y líbero con el tipo de ataque con balón, mientras que, respecto a la posición de colocadora, coinciden las diferencias, pero con una significación menor (Figura 36).

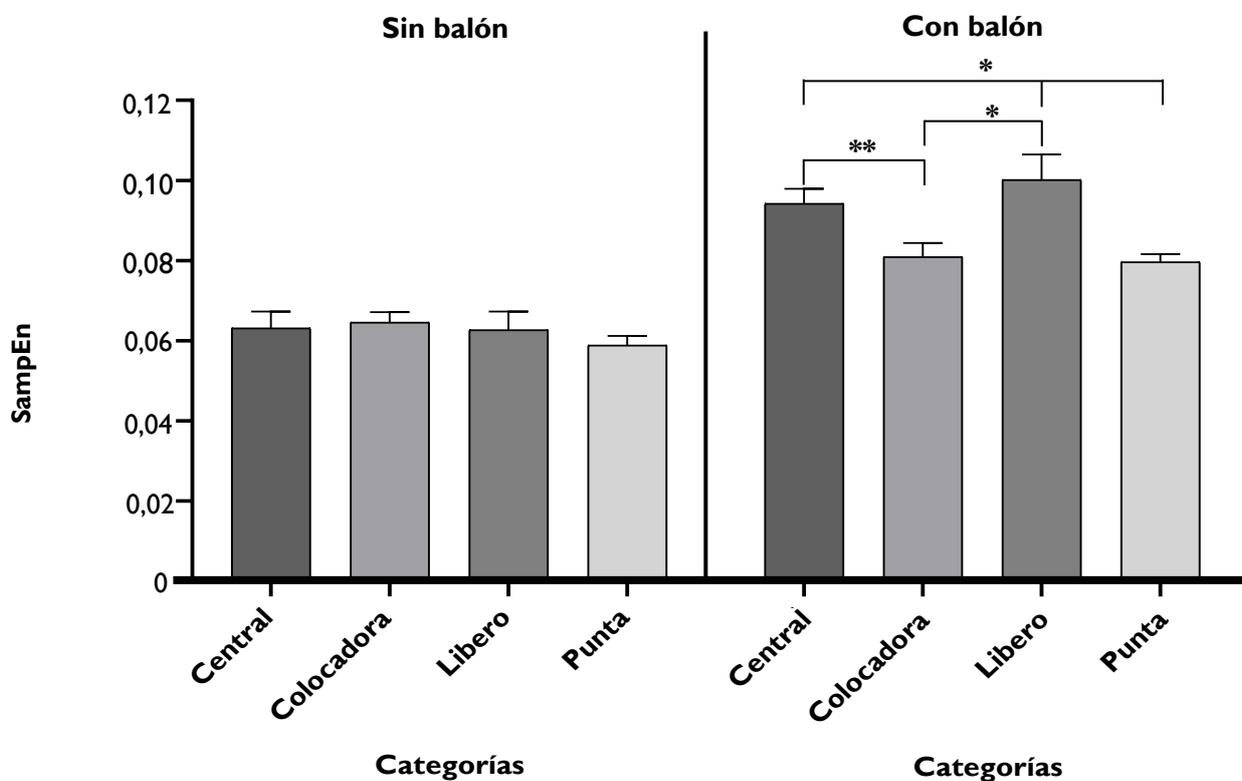


Figura 36. Interacciones entre las posiciones de juego y el tipo de ataque. Las diferencias de significación mostradas son \*  $p < 0,05$  y \*\*  $p < 0,1$ .

En el test sobre el factor aleatorio del modelo encontramos que el efecto de la jugadora es significativo ( $p < 0,001$ ). Al incorporar los factores *categoría* y *posición*, y resultar significativos, aparecen menos jugadoras con un efecto significativo, lo que permite controlar más la variabilidad del estudio y, por lo tanto, restar variabilidad a las medidas repetidas, las jugadoras.

## Discusión

El objetivo de este estudio fue analizar la variabilidad de la CBR en las diferentes categorías del voleibol (*infantil, cadete, juvenil y sénior*) y entre los roles específicos del juego (colocadora, punta, central, líbero), en un club de élite.

Confirmando parcialmente la primera hipótesis, la variabilidad de la CBR con balón fue superior en la categoría *infantil*, en comparación con el resto de las categorías, en las que no se encontraron diferencias. Era de esperar que el rendimiento y, por lo tanto, la VM fuese menor en jugadoras expertas, debido a su mayor capacidad para controlar la coordinación de los grados de libertad del espacio articular a través de la práctica (Chapman et al., 2009; Ko & Newell, 2015; Ko et al., 2018; Williams et al., 2016). El hecho de que esta reducción y estabilización de la VM apareciese ya en la etapa *cadete* podría deberse a que en esta etapa se alcanzaría la madurez del PM de la CBR, manteniéndose relativamente estable en las siguientes. Un PM como la CBR se desarrolla pasando por tres estadios diferenciados: inicial, elemental y maduro. A medida que cada patrón pasa a través de cada estadio se producen cambios claros y notables en las acciones corporales (McClenaghan & Gallahue, 1985). La madurez de un patrón se relaciona con un modelo formal de referencia y es independiente de la edad; se puede alcanzar en la etapa de la infancia o en otro momento de la vida, o quizás nunca sea logrado (McClenaghan & Gallahue, 1985; Wickstrom, 1990). En este desarrollo evolutivo de los patrones fundamentales de movimiento, como es el caso de la CBR, compuesta de un desplazamiento, un salto y un golpeo, factores como la fluidez y la precisión en los movimientos, así como la fuerza empleada para la realización de este PM, van mejorando en el transcurso de cada etapa (Gamboa, 2010). En el caso de la CBR, habría momentos clave del PM que determinarían el éxito de la acción en cuanto a la consecución de la máxima altura para el golpeo. Para conseguir la máxima altura posible, el factor clave sería alcanzar la máxima velocidad horizontal que se pudiera convertir en potencia vertical en el momento del despegue (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Wagner et al., 2009). Para conseguir esta velocidad son importantes los ángulos de orientación de la pelvis y el tronco, que serán los que ayudarán a conseguir la posición óptima para acelerar los segmentos más distales del cuerpo durante la CBR (Serrien et al., 2016a). Serrien estudió a jugadores y jugadoras de dos niveles: profesionales de la categoría sénior en España y jóvenes promesas de un centro de tecnificación belga, de entre 14 y 18 años, edades que equivalen a las categorías cadete y juvenil en España. En este estudio, midieron las diferencias entre hombres y mujeres, y entre

profesionales y jóvenes promesas, mediante un mapeo estadístico paramétrico como herramienta innovadora de análisis de la biomecánica de un movimiento complejo (Pataky et al., 2013). Concretamente, analizaron, junto a la técnica cinemática de 3D, toda la serie temporal del movimiento de la CBR, a diferencia de la mayoría de estudios en los que se analizaron puntos de tiempo concretos, seleccionados de toda la secuencia de movimiento (Chen et al., 2011; Coleman et al., 1993; Fuchs, Fusco, et al., 2019; Fuchs, Menzel, et al., 2019a; Ikeda et al., 2017; Tilp et al., 2008; Zahálka et al., 2017). En este estudio también se analizó la CBR con balón. La conclusión principal, que concuerda con los resultados de este estudio, fue que no había modificaciones en ninguno de los tres ejes de coordenadas, en los ángulos de orientación de la pelvis y el tronco, al comparar las jugadoras jóvenes de entre 14 y 18 años con las jugadoras adultas. Por el contrario, sí que encontraron diferencias significativas entre promesas y profesionales respecto a la velocidad alcanzada en estas partes del cuerpo en tres fases de la CBR. La alta homogeneidad encontrada en los ángulos de orientación de pelvis y tronco mostró que se había alcanzado con anterioridad la madurez del PM. La madurez del PM de la CBR podría fijar, por un lado, la trayectoria del centro de gravedad durante la CBR, pudiendo ser clave en el valor de la VM de esta, ya que se haría más consistente el ambiente interno (Kudo, 2008), y, por otro lado, el hecho de tener fijada la pelvis en los ángulos de orientación adecuados sería un punto clave para mejorar el rendimiento de la técnica en patrones de movimiento de carrera, disminuyendo así su VM (Cazzola et al., 2016). Además, debemos resaltar que, en nuestro estudio, las jugadoras de categoría *infantil* presentaron un *tvuelo* muy inferior al resto de categorías, manteniéndose más estables a partir de la categoría *cadete*. Esta constatación evidencia que los pasos de aproximación y el despegue de la CBR con balón aún no estarían optimizados, pudiendo afectar a los ángulos de orientación de la pelvis y el tronco (Serrien et al., 2016a). A su vez, Serrien (2016) describió cambios entre jóvenes y adultas en elementos de la fase aérea de la CBR. En concreto, encontró una mayor velocidad de inclinación lateral del tronco en el momento del impacto y una menor altura en el golpeo por una flexión mayor del codo en el momento de descarga del brazo hacia el balón. Todos estos elementos probablemente generarían mínimas variaciones en el patrón del movimiento, a pesar de que serían determinantes en la precisión y la exactitud del gesto (Bisagno & Morra, 2018; Gamboa, 2010; Serrien et al., 2016a). Estas pequeñas variaciones no serían suficientes para modificar de forma sustancial la variabilidad del movimiento a partir de la categoría *cadete*. A tenor de estos resultados, sería posible defender que cuando las jugadoras alcanzaran la madurez del PM

generarían un perfil de rendimiento exclusivo, que configuraría lo que se ha denominado la huella digital de las jugadoras, fruto de sus características morfológicas y su historial deportivo (Couceiro et al., 2013).

Los movimientos no deberían presentar una variabilidad aleatoria producida simplemente por el ruido, sino una variabilidad compensatoria y adaptativa, consecuencia del continuo ajuste al entorno (Bernstein, 1967, 1996; Kudo, 2008). Los movimientos de los deportistas se producen combinando, coordinando y acoplando las variabilidades que existen en múltiples niveles de los entornos internos y externos (Kudo, 2008).

No solo una mayor reproducibilidad del PM haría que disminuyera la VM, a través del aumento de su consistencia en el ambiente interno, sino que el ambiente externo también tendería a ser más consistente cuando se realice la habilidad motora (Kudo, 2008). En este sentido, para conseguir un ambiente externo más consistente y poder ajustar correctamente la CBR con el balón como móvil, deberíamos tener en cuenta la capacidad perceptiva visual de las jugadoras como un factor que podría influir en la VM de la CBR con balón. Sabemos que las jugadoras, a medida que pasan de noveles a expertas, fueron adquiriendo una capacidad perceptiva mayor que les permitió mejorar y optimizar los patrones motores (Sillero, 2002). Así, vemos estudios en diferentes deportes donde demostraron que, a mayor grado de experiencia, tenían un mayor control de los mecanismos de obtención de información, realizando fijaciones más largas y precisas, con mayor atención a la bola o al hoyo durante la práctica del golf (Vickers, 1992). Se adaptaron mejor a las trayectorias anómalas de la bola (Ripoll & Latiri, 1997; Tresilian, 2004). Fueron capaces de simultanear mejor otra actividad mientras realizaban una tarea motriz, disminuyendo menos su rendimiento (Smith & Chamberlin, 1992). Actuaron de manera más precisa (Oudejans et al., 1997; Williams & Davids, 1998), aunque las capacidades perceptivas fuesen semejantes (McLeod, 1987; Petrakis, 1981). Ejecutaron antes la acción, gracias al uso de claves que les permitió anticipar la trayectoria de la pelota, como sería el movimiento del brazo en *squash* (Abernethy, 1990). Obtuvieron mejor información previa al lanzamiento de la bola en el saque en el tenis porque centraron su atención en la zona desde donde iba a salir la bola y no se dispersaron (Loffing & Cañal-Bruland, 2017; Müller & Abernethy, 2012; Shank & Haywood, 1987).

Por otro lado, en un estudio realizado con jugadores de voleibol masculino, se ha demostró que los deportistas expertos fueron más rápidos y precisos en predecir la dirección

de la colocación, mostrando una superior habilidad para decodificar la información específica del deporte al realizar la tarea (Piras et al., 2014). En otro estudio observaron que los deportistas expertos realizaron menos fijaciones oculares y de mayor duración, pasando más tiempo mirando primero la trayectoria del pase inicial y luego las manos del colocador, sin tener en cuenta la trayectoria del balón, mostrándose capacitados para extraer la información más relevante y ejecutar la tarea con la mejor estrategia posible (Piras et al., 2010). También Vansteenkiste (2014) observó que las jugadoras principiantes tuvieron un tiempo de reacción superior al de las jugadoras intermedias y expertas, sugiriendo que las jugadoras expertas utilizaban más información proveniente de las regiones perifoveales, encargadas de desarrollar una mayor agudeza visual. A tenor de los resultados encontrados en este estudio, podríamos pensar que, a partir de la categoría *cadete*, la consistencia del ambiente interno y externo sería parecida, lo que explicaría las pocas variaciones en la variabilidad del movimiento.

Si tenemos en cuenta el proceso de aprendizaje de un PM como un factor que podría modificar los valores de VM a través del tiempo, observaremos que podrían aparecer diferentes procesos de aprendizaje que tendrían diferentes propósitos. Cuando un deportista aprende un nuevo gesto motor pasa por tres etapas: cognitiva, asociativa y autónoma, que difieren entre sí en el grado de dominio con el que se realiza el gesto técnico y en su demanda de recursos atencionales (Fitts, 1964). De este modo, la memoria de trabajo (capacidad M), referente a la capacidad de gestionar los recursos atencionales, demostró ser una variable altamente predictiva para realizar correctamente el ataque en voleibol, mientras que la experiencia representó un predictor crucial para la realización técnica de forma pulida. En otras palabras, para tener éxito en una tarea que genere un PM, el primer requisito sería la capacidad de integrar todos los esquemas motores involucrados, de manera que, una vez se hubiera adquirido el PM estable, repetirlo una y otra vez permitiría al deportista automatizarlo y aumentar su precisión para alcanzar un gesto cada vez más exacto (Bisagno & Morra, 2018). Asimismo, conocemos que el grado de complejidad y la variabilidad de un movimiento están relacionados con el número de esquemas motores que tienen y con sus interacciones funcionales (Van Emmerik & Van Wegen, 2002). Para la CBR con balón, Bisagno (2018) describió 6 esquemas motores distintos integrados en el gesto técnico: dirección en el plano horizontal, profundidad de golpeo, lectura de la trayectoria del balón, control de la carrera, tiempo de ataque y movimiento de cierre de la muñeca. Bisagno (2018) realizó la medición de la CBR con balón después de una colocación y buscando con el remate la precisión dentro de un círculo, comprobando que la mayoría de los

errores se sucedieron por empezar la CBR en el momento equivocado o por retrasar demasiado el golpeo con el brazo. La metodología utilizada en este estudio fue similar a la que utilizamos en el nuestro, con la diferencia de que, para considerar un remate válido, era suficiente que el balón impactase dentro del campo, tras superar la red. A su vez, tanto la capacidad atencional como el grado de experiencia de la jugadora afectaron en partes clave de la realización de un PM ya que, de los 6 esquemas motores, la capacidad atencional y el grado de experiencia tienen influencia en 4, concretamente en la dirección en el plano horizontal, la lectura de la trayectoria del balón, el control de la carrera y el tiempo de ataque. Además, se encontró que cuanto mayor capacidad de memoria de trabajo tiene una jugadora, mejor realizará la tarea de la CBR con balón, mientras que cuanto más experiencia acumule la jugadora, más perfecta y precisa será su técnica de la CBR (Bisagno & Morra, 2018; Serrien et al., 2016a). Los valores de capacidad de memoria de trabajo aumentaron súbitamente en la franja de edad de los 15 a los 17 años, mientras que la mejoría por la experiencia fue en aumento constante a través de los años (Bisagno & Morra, 2018). En este estudio los resultados son similares a los aportados por Bisagno en los que, a los 15 años (categoría *cadete*), se detecta una mejora sustancial en la calidad de ejecución de la CBR con balón, del mismo modo que en este estudio se encuentra una disminución de la VM.

En este estudio, analizando un total de 48 jugadoras (24 *puntas*, 12 *centrales*, 7 *colocadoras* y 5 *liberos*), hemos podido corroborar la segunda hipótesis planteada, al obtener los valores más bajos de variabilidad en la CBR en las jugadoras de posición punta. El diseño del estudio ayudaba a que esto fuese así, por haber escogido una colocación alta por ambas zonas de ataque (zona II y zona IV), que sería el tipo de colocación a la que se enfrentarían normalmente estas jugadoras, mientras que las *centrales* se enfrentarían a unas colocaciones más bajas y preferentemente por la zona central del campo (Lobiatti, 2010) y las *colocadoras* y las *liberos* no realizarían habitualmente la CBR. Teniendo en cuenta que los deportistas consiguen reducir la variabilidad de sus movimientos deportivos a través de la práctica (Bartlett et al., 2007), era de esperar que en este PM específico de la CBR con balón, colocado alto por zona II y por zona IV, la VM más baja apareciese en las *puntas*, que son las que más repeticiones acumulan en estas posiciones a lo largo de una temporada (Skazalski et al., 2018) y a lo largo de su vida deportiva. Estudios sobre el cambio de la complejidad del movimiento con la práctica encuentran que, en general, la complejidad de la dinámica del atractor (patrón de valores esperados del movimiento) podría reducirse en función de la práctica (Haken, 1996; Mitra et al., 1998; Newell

& Vaillancourt, 2001). En un estudio en rugby (Fernández-Valdés, 2020), en el que se analizaron los cambios en la VM en los placajes para diferentes posiciones, se observó cómo los jugadores delanteros tenían la menor VM de todos los jugadores, siendo la práctica y la experiencia en ese gesto fundamentales para reducir la VM (Newell et al., 2003). En el voleibol, las jugadoras de posición punta realizan unos 40 000 remates en una temporada (Kugler et al., 1996; Serrien et al., 2016a) que, junto a los valores más bajos de VM obtenidos en nuestro estudio, pueden sugerir que las jugadoras de categoría punta se ajustan mejor para realizar la CBR con balón.

## **Conclusiones**

La VM de la CBR con el condicionante del balón, disminuye al pasar de la categoría *infantil* a *cadete*, manteniéndose a partir de entonces relativamente estable.

La variabilidad de la CBR con el condicionante del balón es más baja en las jugadoras punta.



## **9. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GLOBALES**



El objetivo general de esta tesis fue analizar las fuerzas de impacto en la zona lumbar y la VM en la ejecución de la CBR realizada por el lado derecho e izquierdo del campo y con y sin el condicionante del balón en jugadoras de voleibol de diferentes categorías y posiciones en el campo en un club de élite.

En la CBR con el condicionante del balón, las fuerzas de impacto producidas en la zona lumbar son superiores a las producidas en la CBR sin el condicionante del balón en la mayoría de los apoyos, mientras que el  $t_{CBR}$  y el  $t_{vuelo}$  fueron inferiores a la CBR realizada sin balón.

El principal hallazgo fue que la CBR con el condicionante del balón incrementó las fuerzas de impacto en la mayoría de los apoyos, en comparación con la CBR sin el condicionante del balón, corroborando parcialmente la primera hipótesis del estudio. Concretamente, las fuerzas de impacto medidas a nivel de la vértebra L5 fueron superiores con balón en  $a1$ ,  $a3$  y  $a5$ . Estos resultados podrían atribuirse a que el condicionante del balón requiere ajustes constantes en la longitud de la zancada, en el tiempo de reacción y en la aproximación al balón, tal y como describió Wagner (2009), lo que conlleva unas superiores demandas motoras, cognitivas y sensoriales, dada la mayor complejidad del movimiento (Kudo, 2008). Los valores superiores en  $a1$ , con el condicionante del balón podrían estar asociados a un inicio más brusco por el hecho de que la colocación determina el momento de inicio y la velocidad adecuada de la CBR (Lobiatti, 2010). Una mayor altura en el salto en la CBR se consigue mediante un acercamiento enérgico que se refleja, en primera instancia, en  $a1$  y, posteriormente, en  $a2$  y  $a3$  (Fuchs, Menzel, et al., 2019a). En el impulso de aceleración  $a3$ , los valores superiores con el condicionante del balón podrían ser fruto de la mayor energía acumulada durante los primeros pasos de la CBR, maximizando el despegue. La habilidad de optimizar la velocidad de aproximación horizontal en la CBR durante  $a1$  y  $t1-2$  y la de decelerar en  $a2$  para convertirla en velocidad vertical durante  $a3$ , será la que generará correlación positiva con el resultado del salto final (Fuchs, Fusco, et al., 2019). Por lo que se refiere a la fase de aterrizaje en  $a5$ , los valores superiores con el condicionante del balón pudieron ser por las jugadoras suelen caer de forma más desequilibrada por la asimetría que genera el golpeo del balón en el aire (Marquez et al., 2009), lo que podría originar una menor eficiencia en la amortiguación del impacto, a pesar del menor tiempo de vuelo. A su vez, seguramente las jugadoras prestaron menor atención a la caída, ya que el foco de atención se centraría en seguir la trayectoria descrita por el balón después del contacto (Lenoir et al., 1999; Müller & Abernethy, 2012). Esto llevó a las jugadoras a realizar el  $a5$  en un

43,83% con un solo apoyo con el condicionante del balón (un 17,40% en el condicionante sin balón), lo que implicaría más dificultades para conseguir sujetar muscularmente el cuerpo de forma óptima durante el aterrizaje (Salci et al., 2004). Como preveíamos, el *tvuelo* y el *tCBR* fueron mayores en la CBR sin el condicionante del balón (3,47% y 5,67% respectivamente). Ikeda (2017) mostró cómo el ritmo fluido y la coordinación eran los que permitían una mayor altura y *tvuelo* al medir la altura del salto a través del dispositivo VERTEC. Ikeda definió los factores más importantes para conseguir la máxima altura del salto y, por consiguiente, mayor *tvuelo* en la CBR: la velocidad vertical del centro de gravedad en el despegue, la velocidad horizontal en el contacto del segundo paso de la batida de despegue y la desaceleración de la velocidad horizontal del centro de gravedad desde el apoyo del segundo paso de la batida hasta el despegue. En nuestro estudio, observamos cómo esta fluidez se rompió con el condicionante del balón, debido a los ajustes realizados en los primeros pasos de la CBR, que generaron valores superiores en la fuerza de los impactos en *a1* y *a3*, y menores en *a2*, impidiendo alcanzar alturas de salto parecidas a las obtenidas sin el condicionante del balón disminuyendo así el *tvuelo* y la *tCBR* con el condicionante del balón.

La VM de la CBR es más alta cuando se realiza con el condicionante del balón, no presenta variaciones cuando se realiza por el lado derecho e izquierdo del campo, es más baja en la categoría infantil en comparación con el resto de las categorías y en las jugadoras punta en comparación con las centrales, colocadoras y líberos.

En cuanto a la VM en la CBR con el condicionante del balón se encontraron amplias diferencias en la variabilidad de la CBR entre las jugadoras, pudiéndose comparar los registros de aquellas que se encontraban más alejadas de la media, con valores superiores e inferiores, lo que mostró la existencia de un perfil de rendimiento exclusivo, fruto de sus características morfológicas y su historial deportivo, que podría considerarse la firma o huella digital de cada una de ellas (Couceiro et al., 2013). Además, la VM de la CBR con balón fue más alta que sin el condicionante del balón. Una de las explicaciones a esta mayor variabilidad sería que cuando se rematara un balón en una situación de juego, deberían realizarse ajustes en la amplitud de los pasos de la CBR, en el tiempo de reacción y en la trayectoria hacia el balón (Wagner et al., 2009) que no serían forzados al realizarse sin el condicionante del balón. Además, cuando los deportistas deberían ajustar una acción motriz a un objeto en movimiento, la lectura de la trayectoria se vería dificultada cuando el sujeto estuviese en movimiento o realizando

simultáneamente una acción diferente (Sillero, 2002). Por esta razón, probablemente en nuestro estudio las jugadoras mostraron una menor eficiencia y, consecuentemente, una mayor variabilidad en sus movimientos cuando realizaban la CBR con el condicionante del balón. En cuanto al condicionante externo de la zona del campo (derecha e izquierda), no se observaron diferencias ante este condicionante tanto con y sin balón, viéndose como no tendrían una afectación a la VM de la CBR: los diferentes ángulos de la trayectoria respecto a la red en cada lado (Bertucci et al., 1987); las diferencias de lado en la llegada del balón para su golpeo (Beal, 1989), ni las dificultades para captar la información relevante para realizar correctamente la interceptación del balón cuando el colocador está de espaldas a la atacante (Nettleton, 1979; Whiting, 1969). Mostrando de esta forma que la CBR como habilidad compleja específica sería un PM estable (Zahalka et al., 2017).

Al analizar cómo afectaron los condicionantes internos a la VM de la CBR, observamos cómo en el condicionante de la categoría los valores fueron superiores para la categoría infantil, estabilizándose en el resto de las categorías a partir de la cadete, esta particularidad podría deberse a que en esta etapa se alcanzaría la madurez del PM de la CBR, manteniéndose relativamente estable en las siguientes. Un PM como la CBR se desarrolla pasando por tres estadios diferenciados: inicial, elemental y maduro. A medida que cada patrón pasa a través de cada estadio se producen cambios claros y notables en las acciones corporales (McClenaghan & Gallahue, 1985). En este desarrollo evolutivo de los patrones fundamentales de movimiento, como es el caso de la CBR, compuesta de un desplazamiento, un salto y un golpeo, factores como la fluidez y la precisión en los movimientos, así como la fuerza empleada para la realización de este PM, van mejorando en el transcurso de cada etapa (Gamboa, 2010). En el caso de la CBR, los momentos clave del PM que determinarían el éxito de la acción para conseguir la máxima altura posible, sería alcanzar la máxima velocidad horizontal que se pudiera convertir en potencia vertical en el momento del despegue (Fuchs, Fusco, et al., 2019; Wagner et al., 2009). Para conseguir esta velocidad son importantes los ángulos de orientación de la pelvis y el tronco, que serán los que ayudarán a conseguir la posición óptima para acelerar los segmentos más distales del cuerpo durante la CBR (Serrien et al., 2016a), en ese mismo estudio se observó que no hubo modificaciones, en los ángulos de orientación de la pelvis y el tronco, al comparar las jugadoras jóvenes de entre 14 y 18 años con las jugadoras adultas, pudiendo intuir que esta la estabilización en estos ángulos se realizó en el momento del cambio de la categoría infantil a cadete. No obstante, no solo una mayor reproducibilidad del PM haría que disminuyera la VM,

a través del aumento de su consistencia en el ambiente interno, sino que el ambiente externo también tendería a ser más consistente cuando se realice la habilidad motora (Kudo, 2008). En este sentido, para conseguir un ambiente externo más consistente y poder ajustar correctamente la CBR con el balón como móvil, se debería tener en cuenta la capacidad perceptiva visual de las jugadoras como un factor que podría influir en la VM de la CBR con balón. En estudios realizados con jugadores de voleibol se concluyó: que las jugadoras principiantes tuvieron un tiempo de reacción superior al de las jugadoras intermedias y expertas, sugiriendo que las jugadoras expertas utilizaban más información proveniente de las regiones perifoveales, encargadas de desarrollar una mayor agudeza visual (Vansteenkiste et al., 2014); que los deportistas expertos realizaron menos fijaciones oculares y de mayor duración, pasando más tiempo mirando primero la trayectoria del pase inicial y luego las manos del colocador, sin tener en cuenta la trayectoria del balón, mostrándose capacitados para extraer la información más relevante y ejecutar la tarea con la mejor estrategia posible (Piras et al., 2010); que los deportistas expertos fueron más rápidos y precisos en predecir la dirección de la colocación, mostrando una superior habilidad para descodificar la información específica del deporte al realizar la tarea (Piras et al., 2014). De esta forma, podríamos pensar que, a partir de la categoría *cadete*, la consistencia del ambiente interno y externo sería parecida, lo que explicaría las pocas variaciones en la variabilidad del movimiento.

Finalmente, en el condicionante interno de la posición de juego los valores más altos se obtuvieron en la posición punta, teniendo en cuenta que los deportistas consiguen reducir la variabilidad de sus movimientos deportivos a través de la práctica (Bartlett et al., 2007), era de esperar que en este PM específico de la CBR con balón, colocado alto por zona II y por zona IV, la VM más baja apareciese en las *puntas*, que son las que más repeticiones acumulan en estas posiciones a lo largo de una temporada (Skazalski et al., 2018) y a lo largo de su vida deportiva. Estudios sobre el cambio de la complejidad del movimiento con la práctica encontraron que, en general, la complejidad de la dinámica del atractor (patrón de valores esperados del movimiento) podría reducirse en función de la práctica (Haken, 1996; Mitra et al., 1998; Newell & Vaillancourt, 2001). En un estudio en rugby (Fernández-Valdés, 2020), en el que se analizaron los cambios en la VM en los placajes para diferentes posiciones, se observó cómo los jugadores delanteros tenían la menor VM de todos los jugadores, siendo la práctica y la experiencia en ese gesto fundamentales para reducir la VM (Newell et al., 2003). En el voleibol, no es de extrañar que las jugadoras punta presenten unos valores bajos de VM si atendemos al elevado volumen de

ataques que pueden llegar a hacer en una temporada que puede alcanzar los 40 000 remates (Kugler et al., 1996; Serrien et al., 2016a). Los valores bajos de VM reflejan una gran regularidad en el movimiento lo que, en cierta manera, supone una fuerte limitación para que el entrenamiento basado en la repetición sistemática de este movimiento pueda generar nuevas adaptaciones. Por esta razón, parece lógico que en los entrenamientos se propongan variaciones en la presentación del estímulo que supongan nuevos retos sin perder la esencia del PM



## **10. REFERENCIAS**



- Aagaard, H., Scavenius, M., & Jørgensen, U. (1997). An epidemiological analysis of the injury pattern in indoor and in beach volleyball. *International Journal of Sports Medicine*, 18(3), 217–221. <https://doi.org/10.1055/s-2007-972623>
- Abendroth-Smith, J., & Kras, J. (1999). More B-BOAT: The Volleyball Spike: Bump Set Spike! *Journal of Physical Education, Recreation & Dance*, 70(3), 56–59. <https://doi.org/10.1080/07303084.1999.10605897>
- Abernethy, B. (1990). Anticipation in squash: Differences in advance cue utilization between expert and novice players. *Journal of Sports Sciences*, 8(1), 17–34. <https://doi.org/10.1080/02640419008732128>
- Adami, C., Ofria, C., & Collier, T. C. (2000). Evolution of biological complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(9), 4463–4468. <https://doi.org/10.1073/pnas.97.9.4463>
- Ahmadi, A., Rowlands, D., & James, D. A. (2009). Towards a wearable device for skill assessment and skill acquisition of a tennis player during the first serve. *Sports Technology*, 2(3–4), 129–136. <https://doi.org/10.1080/19346182.2009.9648510>
- Allen, D., McAleer, M., Powell, R., & Singh, A. (2013). A Non-Parametric and Entropy Based Analysis of the Relationship between the VIX and S&P 500. *Journal of Risk and Financial Management*, 6(1), 6–30. <https://doi.org/10.3390/jrfm6010006>
- Amato, I. (1992). Chaos breaks out at NIH, but order may come of it. In *Science (New York, N.Y.)* (Vol. 256, Issue 5065, pp. 1763–1764). <https://doi.org/10.1126/science.1615321>
- Andreas, G. (1978). *Psicología Experimental*. Limusa.
- Aragón-Vargas, L. F., & Gross, M. M. (2011). Kinesiological Factors in Vertical Jump Performance: Differences among Individuals. *Journal of Applied Biomechanics*, 13(1), 24–44. <https://doi.org/10.1123/jab.13.1.24> [10.1123/jab.13.1.24](https://doi.org/10.1123/jab.13.1.24) [10.1123/jab.13.1.24](https://doi.org/10.1123/jab.13.1.24) [10.1123/jab.13.1.24](https://doi.org/10.1123/jab.13.1.24)
- Balasis, G., Donner, R. V., Potirakis, S. M., Runge, J., Papadimitriou, C., Daglis, I. A., Eftaxia, K., & Kurths, J. (2013). Statistical mechanics and information-theoretic perspectives on complexity in the Earth system. *Entropy*, 15(11), 4844–4888. <https://doi.org/10.3390/e15114844>
- Barbado Murillo, D., Sabido Solana, R., Vera-Garcia, F. J., Gusi Fuertes, N., & Moreno, F. J. (2012). Effect of increasing difficulty in standing balance tasks with visual feedback on postural sway and EMG: complexity and performance. *Human Movement Science*, 31(5), 1224–1237. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.01.002>
- Bartlett, R., Wheat, J., & Robins, M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports Biomechanics*, 6(2), 224–243. <https://doi.org/10.1080/14763140701322994>
- Baudry, L., Sforza, C., Leroy, D., Lovecchio, N., Gautier, G., & Thouvarecq, R. (2009). Amplitude variables of circle on the pedagogic pommel horse in gymnastics. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(3), 705–711. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181a00be8>

- Beal, D. (1989). *Basic Team System and Tactics. Coaches Manual I*. FIVB.
- Benson, L. C., Tait, T. J., Befus, K., Choi, J., Hillson, C., Stilling, C., Grewal, S., MacDonald, K., Pasanen, K., & Emery, C. A. (2020). Validation of a commercially available inertial measurement unit for recording jump load in youth basketball players. *Journal of Sports Sciences*, 38(8), 928–936. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1737360>
- Bergun, M., Aydin, M., Çolak, T., Özbek, A., & Bulgan, C. (2009). 3D Kinematic Analysis of Overarm Movements for different Sports. *Kinesiology*, 41(1), 105–111.
- Bermejo, Palao, & Valadés. (2013). Análisis Del Remate De Voleibol En Jugadoras De Élite Analysis of Volleyball Spike in Female Elite Players. *Agon International Journal of Sport Sciences*, 3(1), 22–32. [http://agonjournal.com/wp-content/uploads/2013/05/6\\_Bermejo\\_3\\_1\\_AGON\\_22\\_32.pdf](http://agonjournal.com/wp-content/uploads/2013/05/6_Bermejo_3_1_AGON_22_32.pdf)
- Bernstein, N. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. Pergamon.
- Bernstein, N. (1996). *Dexterity and its development* (M. Latash & M. Turvey (eds.)). Taylor & Francis.
- Bertucci, B., Beal, D., Banachowsky, A., Coleman, J., & Compton, F. (1987). *Guía de Voleibol de la A.E.A.B* (Deporte &). Paidotribo.
- Best, R. J., Bartlett, R. M., & Sawyer, R. A. (1995). Optimal Javelin release. *Journal of Applied Biomechanics*, 11(4), 371–394. <https://doi.org/10.1123/jab.11.4.371>
- Bisagno, E., & Morra, S. (2013). Articolo Analisi evolutiva dei processi attentivi in giovani giocatori di pallavolo. *Giornale Italiano Di Psicologia Dello Sport*, 17(July), 3–9.
- Bisagno, E., & Morra, S. (2015). *Analysis of the Relation between M-Capacity Development, Expertise and Motor Learning in Young Volleyball Players*. 1956, 548–553.
- Bisagno, E., & Morra, S. (2018). How do we learn to “kill” in volleyball?: The role of working memory capacity and expertise in volleyball motor learning. *Journal of Experimental Child Psychology*, 167, 128–145. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.10.008>
- Bisseling, R. W., Hof, A. L., Bredeweg, S. W., Zwerver, J., & Mulder, T. (2008). Are the take-off and landing phase dynamics of the volleyball spike jump related to patellar tendinopathy? *British Journal of Sports Medicine*, 42(6), 483–489. <https://doi.org/10.1136/bjism.2007.044057>
- Blackburn, J. T., & Padua, D. A. (2009). Sagittal-plane trunk position, landing forces, and quadriceps electromyographic activity. *Journal of Athletic Training*, 44(2), 174–179. <https://doi.org/10.4085/1062-6050-44.2.174>
- Bompa, T. O., & Buzzichelli, C. A. (2017). Periodización del entrenamiento deportivo. *Paidotribo*, 387. <https://play.google.com/books/reader?id=ZVSRDwAAQBAJ&hl=es>
- Bootsma, R. J., & van Wieringen, P. C. W. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. In *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* (Vol. 16, Issue 1, pp. 21–29). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.1.21>
- Borg, F. G., & Laxaback, G. (2010). Entropy of balance - Some recent results. *Journal of*

- NeuroEngineering and Rehabilitation*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-7-38>
- Botwinick, J., & Thompson, L. W. (1966). Premotor and motor components of reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 71(1), 9–15. <https://doi.org/10.1037/h0022634>
- Bowman, J. A. (2001). *Effect of two volleyball arm swings on post-impact ball velocity*. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=s3h&AN=SPHS-849828&lang=pt-br&site=ehost-live&authtype=ip,cookie,uid%0Ahttp://kinpubs.uoregon.edu/>
- Boyd, L. J., Ball, K., & Aughey, R. J. (2011). The reliability of minimaxx accelerometers for measuring physical activity in Australian football. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 6(3), 311–321. <https://doi.org/10.1123/ijpspp.6.3.311>
- Bressel, E., & Cronin, J. (2005). The Landing Phase of a Jump Strategies to Minimize Injuries. In *JOPERD: The Journal of Physical Education, Recreation & Dance* (Vol. 76, Issue 2, pp. 31–47).
- Briner, W., & Kacmar, L. (1997). Common injuries in volleyball. Mechanisms of injury, prevention and rehabilitation. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 24(1), 65–71. <https://doi.org/10.2165/00007256-199724010-00006>
- Brown, J., & Waller, M. (2014). Rotational Angles and Velocities During Down the Line and Diagonal Across Court Volleyball Spikes. *International Journal of Kinesiology and Sports Science*, 2(2), 1–8. <https://doi.org/10.7575/aiac.ijkss.v.2n.2p.1>
- Busa, M. A., & van Emmerik, R. E. A. (2016). Multiscale entropy: A tool for understanding the complexity of postural control. *Journal of Sport and Health Science*, 5(1), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2016.01.018>
- Button, C., Macleod, M., Sanders, R., & Coleman, S. (2003). Examining movement variability in the basketball free-throw action at different skill levels. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74(3), 257–269. <https://doi.org/10.1080/02701367.2003.10609090>
- Caballero, C., Davids, K., Heller, B., Wheat, J., & Moreno, F. J. (2019). Movement variability emerges in gait as adaptation to task constraints in dynamic environments. *Gait and Posture*, 70, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.02.002>
- Campos, J. (1993). Lanzamiento de jabalina. In *Lanzamientos atletismo III*. Real Federación Española de Atletismo.
- Carrero, L. (1973). *Voleibol Femenino*. Editorial Almena.
- Cassell, E. (2001). Spiking injuries out of volleyball. *Monash University Accident Research Centre*, 181, 110. [https://www.monash.edu/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0006/216762/muarc181.pdf](https://www.monash.edu/__data/assets/pdf_file/0006/216762/muarc181.pdf)
- Cavanaugh, J. T., Mercer, V. S., & Stergiou, N. (2007). Approximate entropy detects the effect of a secondary cognitive task on postural control in healthy young adults: a methodological report. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 4, 42. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-42>
- Cazzola, D., Pavei, G., & Preatoni, E. (2016). Can coordination variability identify performance factors and skill level in competitive sport? The case of race walking. *Journal of Sport and Health Science*, 5(1), 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2015.11.005>
- Cerdas, J., Hernández, A. P., & Núñez, P. R. (2002). *El niño entre 4 y 5 años, características de su*

*desarrollo psicomotriz*. 26(1), 169–182.

- Challoumas, D., & Artemiou, A. (2018). Predictors of attack performance in high-level male volleyball players. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 13(9), 1230–1236. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2018-0125>
- Chambers, R., Gabbett, T. J., Cole, M. H., & Beard, A. (2015). The Use of Wearable Microsensors to Quantify Sport-Specific Movements. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(7), 1065–1081. <https://doi.org/10.1007/s40279-015-0332-9>
- Chandler, P. T., Pinder, S. J., Curran, J. D., & Gabbett, T. J. (2014). Physical demands of training and competition in collegiate netball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(10), 2732–2737. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000486>
- Chapman, A., Vicenzino, B., Blanch, P., & Hodges, P. (2009). Do differences in muscle recruitment between novice and elite cyclists reflect different movement patterns or less skilled muscle recruitment? *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(1), 31–34. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsams.2007.08.012>
- Chen, P., Huang, C., & Shih, S. (2011). Differences in 3D kinematics between genders during volleyball spike. *Proceedings of the Congress of the International Society of Biomechanics*.
- Chen, W., Wang, Z., Xie, H., & Yu, W. (2007). Characterization of Surface EMG Signal Based on Fuzzy Entropy. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15(2), 266–272. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2007.897025>
- Chen, Y.-C., & Huang, C. (2008). Kinematical analysis of female volleyball spike. *Coaching and Sports Performance*, 617–620.
- Chow, J. W., Carlton, L. G., Lim, Y.-T., Chae, W.-S., Shim, J.-H., Kuenster, A. F., & Kokubun, K. (2003). Comparing the pre- and post-impact ball and racquet kinematics of elite tennis players' first and second serves: a preliminary study. *Journal of Sports Sciences*, 21(7), 529–537. <https://doi.org/10.1080/0264041031000101908>
- Chung, C. S. (1988). *Three-dimensional analysis of the shoulder and elbow joints during the volleyball spike*. Indiana University.
- Ciapponi, T. M., Mclaughlin, E. J., & Hudson, J. L. (1996). The volleyball approach: An exploration of balance. *Proceedings of the XIIIth International Symposium on Biomechanics in Sports*, 1 990, 282–285.
- Cisar, C. J., & Corbelli, J. (1989). The volleyball spike: a kinesiological and physiological analysis with recommendations for skill development and conditioning programs. *(NSCA) National Strength y Conditioning Association Journal.*, 11(1), 4–9.
- Coleman, S., Benham, A. S., & Northcott, S. R. (1993). A three-dimensional cinematographical analysis of the volleyball spike. *Journal of Sports Sciences*, 11(4), 295–302. <https://doi.org/10.1080/02640419308729999>
- Connaghan, D., Kelly, P., O'Connor, N. E., Gaffney, M., Walsh, M., & O'Mathuna, C. (2011). Multi-sensor classification of tennis strokes. *Proceedings of IEEE Sensors*, 1437–1440. <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2011.6127084>
- Copic, N., Dopsaj, M., Ivanovic, J., Nestic, G., & Jaric, S. (2014). Predictors of Jumping

- Performance: Differences between elite female volleyball competitors and nontrained individuals. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(10), 2709–2716.
- Cormack, S. J., Smith, R. L., Mooney, M. M., Young, W. B., & O'Brien, B. J. (2014). Accelerometer load as a measure of activity profile in different standards of netball match play. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 9(2), 283–291. <https://doi.org/10.1123/ijsp.2012-0216>
- Costa, M, Peng, C.-K., L. Goldberger, A., & Hausdorff, J. M. (2003). Multiscale entropy analysis of human gait dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 330(1), 53–60. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physa.2003.08.022>
- Costa, Madalena, Goldberger, A. L., & Peng, C. K. (2002). Multiscale Entropy Analysis of Complex Physiologic Time Series. *Physical Review Letters*, 89(6), 6–9. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.068102>
- Costa, Madalena, Goldberger, A. L., & Peng, C. K. (2005). Multiscale entropy analysis of biological signals. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 71(2). <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.021906>
- Couceiro, M. S., Clemente, F., Dias, G., Mendes, P., Martins, F., & Mendes, R. (2014). *On an Entropy-based Performance Analysis in Sports*. a008. <https://doi.org/10.3390/ecea-1-a008>
- Couceiro, M. S., Dias, G., Mendes, R., & Araújo, D. (2013). Accuracy of pattern detection methods in the performance of golf putting. *Journal of Motor Behavior*, 45(1), 37–53. <https://doi.org/10.1080/00222895.2012.740100>
- Coutts, K. D. (1982). Kinetic differences of two volleyball jumping techniques. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 14(1), 57–59. <https://doi.org/10.1249/00005768-198201000-00011>
- Cox, R. H. (1974). Relationship between selected volleyball skill components and team performance of men's northwest "aa" volleyball teams. *Research Quarterly of the American Alliance for Health, Physical Education and Recreation*, 45(4), 441–446. <https://doi.org/10.1080/10671315.1974.10615292>
- Cronin, J. B., Bressel, E., & Finn, L. (2008). Augmented feedback reduces ground reaction forces in the landing phase of the volleyball spike jump. *Journal of Sport Rehabilitation*, 17(2), 148–159. <https://doi.org/10.1123/jsr.17.2.148>
- Cummins, C., Orr, R., O'Connor, H., & West, C. (2013). Global positioning systems (GPS) and microtechnology sensors in team sports: a systematic review. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 43(10), 1025–1042. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0069-2>
- Cunniffe, B., Proctor, W., Baker, J. S., & Davies, B. (2009). *An Evaluation of the Physiological Demands of Elite Rugby Union Using Global Positioning System Tracking Software*. 23(4), 1187–1195.
- Da Silva, M. L., Piqueira, J. R., & Vieliard, J. M. (2000). Using Shannon entropy on measuring the individual variability in the Rufous-bellied thrush *Turdus rufiventris* vocal communication. *Journal of Theoretical Biology*, 207(1), 57–64. <https://doi.org/10.1006/jtbi.2000.2155>

- Dai, B., Leigh, S., Li, H., Mercer, V. S., & Yu, B. (2013). The relationships between technique variability and performance in discus throwing. *Journal of Sports Sciences*, 31(2), 219–228. <https://doi.org/10.1080/02640414.2012.729078>
- Darling, W. G., Cole, K. J., & Abbs, J. H. (1993). Kinematic variability of grasp movements as a function of practice and movement speed. *Experimental Brain Research*, 73, 225–235.
- Davids, K., Button, C., & Bennett, S. (2008). Dynamics of skill acquisition: A constraints-led approach. In *Dynamics of skill acquisition: A constraints-led approach*. (pp. xi, 251–xi, 251). Human Kinetics.
- Davids, K., Glazier, P., Ara, D., & Bartlett, R. (2003). Movement Systems As Dynamical Systems: The Functional Role Of Variability And Its Implications For Sports Medicine. *Sports Medicine*, 33(4), 245–260.
- Deffeyes, J. E., Harbourne, R. T., DeJong, S. L., Kyvelidou, A., Stuberg, W. A., & Stergiou, N. (2009). Use of information entropy measures of sitting postural sway to quantify developmental delay in infants. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 6, 34. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-6-34>
- Delignières, D., & Torre, K. (2009). Fractal dynamics of human gait: A reassessment of the 1996 data of Hausdorff et al. *Journal of Applied Physiology*, 106(4), 1272–1279. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.90757.2008>
- Dhawale, A. K., Smith, M. A., & Ölveczky, B. P. (2017). The Role of Variability in Motor Learning. *Annual Review of Neuroscience*, 40(May), 479–498. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-072116-031548>
- Dias, G., Couceiro, M. S., Barreiros, J., Clemente, F. M., Mendes, R., & Martins, F. M. L. (2014). Distance and slope constraints: Adaptation and variability in golf putting. *Motor Control*, 18(3), 221–243. <https://doi.org/10.1123/mc.2013-0055>
- Díaz, J. (1996). Análisis y significación de los comportamientos técnicos, tácticos y competitivos del voleibol masculino de los Juegos de la XXV Olimpiada de Barcelona 1992. *Dissertation Seville University*.
- Dingwell, J. B., & Cusumano, J. P. (2000). Nonlinear time series analysis of normal and pathological human walking. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 10(4), 848–863. <https://doi.org/10.1063/1.1324008>
- Donker, S. F., Ledebt, A., Roerdink, M., Savelsbergh, G. J. P., & Beek, P. J. (2008). Children with cerebral palsy exhibit greater and more regular postural sway than typically developing children. *Experimental Brain Research*, 184(3), 363–370. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1105-y>
- Donker, S. F., Roerdink, M., Greven, A. J., & Beek, P. J. (2007). Regularity of center-of-pressure trajectories depends on the amount of attention invested in postural control. *Experimental Brain Research*, 181(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-0905-4>
- Dowell, L. J., Smith, F., Thiebaud, R., & Thigpen, K. (1985). A comparison of range, time of flight and trajectory of the upwards and downward limbs of selected spherical balls thrown for distance. *Journal of Human Movement Studies*, 11, 209–221.

- Dowling, J., & Vamos, L. (1993). Identification of kinetic and temporal factors related to vertical jump performance. *Journal of Applied Biomechanics*, 9, 95–110.
- Drikos, S., Kountouris, P., Laios, A., & Laios, Y. (2009). Correlates of Team Performance in Volleyball. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 9(2), 149–156. <https://doi.org/10.1080/24748668.2009.11868472>
- Duarte, M., & Sternad, D. (2008). Complexity of human postural control in young and older adults during prolonged standing. *Experimental Brain Research*, 191(3), 265–276. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1521-7>
- Eerkes, K. (2012). Volleyball injuries. *Current Sports Medicine Reports*, 11(5), 251–256. <https://doi.org/10.1249/JSR.0b013e3182699037>
- Elvin, N. G., Elvin, A. A., Arnoczky, S. P., & Torry, M. R. (2007). The correlation of segment accelerations and impact forces with knee angle in jump landing. *Journal of Applied Biomechanics*, 23(3), 203–212. <https://doi.org/10.1123/jab.23.3.203>
- Eom, H. J. (1989). *Computer-aided Recording and Mathematical Analysis of Team Performance in Volleyball*. British Columbia.
- Estep, A., Morrison, S., Caswell, S., Ambegaonkar, J., & Cortes, N. (2018). Differences in pattern of variability for lower extremity kinematics between walking and running. *Gait and Posture*, 60(November 2017), 111–115. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.11.018>
- Eston, R. (1996). Kinanthropometry and exercise physiology laboratory manual. Tests, procedures and data. In *British Journal of Sports Medicine* (Vol. 39, Issue 5). <https://doi.org/10.1136/bjism.2004.005777>
- Faienza, M. F., Lassandro, G., Chiarito, M., Valente, F., Ciaccia, L., & Giordano, P. (2020). How Physical Activity across the Lifespan Can Reduce the Impact of Bone Ageing: A Literature Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph17061862>
- Feltner, M. E., Fraschetti, D. J., & Crisp, R. J. (1999). Upper extremity augmentation of lower extremity kinetics during countermovement vertical jumps. *Journal of Sports Sciences*, 17(6), 449–466. <https://doi.org/10.1080/026404199365768>
- Fernández-Valdés, B. (2020). *La variabilidad de movimiento en el entrenamiento de fuerza en los deportes de equipo*. Universitat de Barcelona.
- Ferretti, A. (1986). Epidemiology of jumper's knee. *Sports Medicine*, 3, 289–295.
- Ferretti, A., Ippolito, E., Mariani, P., & Puddu, G. (1983). Jumper ' s knee. *The American Journal of Sports Medicine*, 11(2), 58–62.
- Ferretti, A., Papandrea, P., & Conteduca, F. (1990). Knee Injuries in Volleyball. *Sports Medicine*, 10(2), 132–138. <https://doi.org/10.2165/00007256-199010020-00006>
- Ferris, D. P., Signorile, J. F., & Caruso, J. F. (1995). The relationship between physical and physiological variables and volleyball spiking velocity. In *Journal of Strength and Conditioning Research* (Vol. 9, Issue 1, pp. 32–36). <https://doi.org/10.1519/00124278-199502000-00007>
- Fino, P. C., Nussbaum, M. A., & Brolinson, P. G. (2016). Decreased high-frequency center-of-

- pressure complexity in recently concussed asymptomatic athletes. *Gait and Posture*, 50, 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.08.026>
- Fitts, P. M. (1964). Perceptual-Motor Skill Learning. In *Categories of Human Learning* (Vol. 49, Issue 638). ACADEMIC PRESS INC. <https://doi.org/10.1016/b978-1-4832-3145-7.50016-9>
- Fleisig, G., Chu, Y., Weber, A., & Andrews, J. (2009). Variability in baseball pitching biomechanics among various levels of competition. *Sports Biomechanics*, 8(1), 10–21. <https://doi.org/10.1080/14763140802629958>
- Fontani, G., Ciccarone, G., & Giulianini, R. (2000). Nuove regole di gioco ed impegno fisico nella pallavolo. *Scuola Dello Sport*, 50, 14–20.
- Forthomme, B., Croisier, J. L., Ciccarone, G., Crielaard, J. M., & Cloes, M. (2005). Factors correlated with volleyball spike velocity. *American Journal of Sports Medicine*, 33(10), 1513–1519. <https://doi.org/10.1177/0363546505274935>
- Fuchs, P. X., Fusco, A., Bell, J. W., von Duvillard, S. P., Cortis, C., & Wagner, H. (2019). Movement characteristics of volleyball spike jump performance in females. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 22(7), 833–837. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2019.01.002>
- Fuchs, P. X., Menzel, H.-J. K., Guidotti, F., Bell, J., von Duvillard, S. P., & Wagner, H. (2019a). Spike jump biomechanics in male versus female elite volleyball players. *Journal of Sports Sciences*, 37(21), 2411–2419. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1639437>
- Fuchs, P. X., Menzel, H. J. K., Guidotti, F., Bell, J., von Duvillard, S. P., & Wagner, H. (2019b). Spike jump biomechanics in male versus female elite volleyball players. *Journal of Sports Sciences*, 37(21), 2411–2419. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1639437>
- Gabbett, T. J., Jenkins, D. G., & Abernethy, B. (2012). Physical demands of professional rugby league training and competition using microtechnology. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 15(1), 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2011.07.004>
- Gabbett, T., Jenkins, D., & Abernethy, B. (2010). Physical collisions and injury during professional rugby league skills training. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(6), 578–583. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2010.03.007>
- Gallahue, D., & Ozmun, J. (1995). *Motor development. Children, infants, adolescent, adults*. Brown and Benchmark.
- Gallahue, David. (2006). Understanding motor development. *Understanding Children's Development in the Early Years*, 75–94. <https://doi.org/10.4324/9781315776347-5>
- Gamboa, R. (2010). *Evaluación del grado de presencia o ausencia de los patrones fundamentales de movimiento en niños y niñas de 4 y 5 años de edad pertenecientes a instituciones educativas de nivel parvulario de JUNJI, INTEGRA y Ministerio de Educación de la ciudad de Viñ*. Universidad de Granada.
- Ganter, N., Krüger, A., Gohla, M., Witte, K., & Edelmann-Nusser, J. (2010). Applicability of a Full Body Inertial Measurement System for Kinematic Analysis of the Discus Throw. *International Symposium on Biomechanics in Sports: Conference Proceedings Archive*, 28, 1–4. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=ip,sso&db=sph&AN=59696384&site=ehost-live&authtype=sso&custid=s9872838>

- García-De-Alcaraz Serrano, A., Ortega, E., & Palao, J. M. (2015). Effect of age group on male volleyball players' technical-tactical performance profile for the spike. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *15*(2), 668–686. <https://doi.org/10.1080/24748668.2015.11868823>
- García, M. T., Martín, Y., & Nieto, A. (1994). *Visión Deportiva*. Colegio Nacional Ópticos-Optometristas.
- Garrido-Castro, J. L., Gil-Cabezas, J., da Silva-Grigoletto, M. E., Mialdea-Baena, A., & González-Navas, C. (2017). Caracterización cinemática 3D del gesto técnico del remate en jugadoras de voleibol. *Revista Andaluza de Medicina Del Deporte*, *10*(2), 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.ramd.2016.02.011>
- Gastin, P. B., McLean, O. C., Breed, R. V. P., & Spittle, M. (2014). Tackle and impact detection in elite Australian football using wearable microsensor technology. *Journal of Sports Sciences*, *32*(10), 947–953. <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.868920>
- Gastin, P. B., McLean, O., Spittle, M., & Breed, R. V. P. (2013). Quantification of tackling demands in professional Australian football using integrated wearable athlete tracking technology. *Journal of Science and Medicine in Sport*, *16*(6), 589–593. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2013.01.007>
- Gerberich, S. G., Luhman, S., Finke, C., Priest, J. D., & Beard, B. (1987). Analysis of severe injuries associated with volleyball activities. *Physician and Sportsmedicine*, *15*, 75–79.
- Ghasemzadeh, H., & Jafari, R. (2011). Coordination Analysis of Human Movements With Body Sensor Networks: A Signal Processing Model to Evaluate Baseball Swings. *IEEE Sensors Journal*, *11*(3), 603–610. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2048205>
- Ghasemzadeh, Hassan, Loseu, V., & Jafari, R. (2009). Wearable coach for sport training: A quantitative model to evaluate wrist-rotation in golf. *JAISE*, *1*, 173–184. <https://doi.org/10.3233/AIS-2009-0021>
- Giannopoulos, N., Vagenas, G., Noutsos, K., Barzouka, K., & Bergeles, N. (2017). Somatotype, Level of Competition, and Performance in Attack in Elite Male Volleyball. *Journal of Human Kinetics*, *58*(1), 131–140. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0082>
- Gibson, C. G. (1979). *Singular points of smooth mappings*. Pitman publishing.
- Glass, L., & Mackey, M. C. (1988). From Clocks to Chaos. The Rhythms of Life. *Princeton University Press, Princeton, NJ*.
- Glassbrook, D. J., Fuller, J. T., Alderson, J. A., & Doyle, T. L. A. (2020). Foot accelerations are larger than tibia accelerations during sprinting when measured with inertial measurement units. *Journal of Sports Sciences*, *38*(3), 248–255. <https://doi.org/10.1080/02640414.2019.1692997>
- Gleick, J. (1997). *Chaos: Making a new science*: Random House. Viking Penguin.
- Goldberger, A. L., Findley, L., Blackburn, M. J., & Mandell, A. J. (1984). Nonlinear dynamics of heart failure. Implications of long-wavelength cardio-pulmonary oscillations. *American Heart Journal*, *107*, 612–5.
- Goldberger, A. L., Peng, C. K., & Lipsitz, L. A. (2002). What is physiologic complexity and how

- does it change with aging and disease? *Neurobiology of Aging*, 23(1), 23–26.  
[https://doi.org/10.1016/S0197-4580\(01\)00266-4](https://doi.org/10.1016/S0197-4580(01)00266-4)
- Goldberger, A. L., Rigney, D. R., Mietus, J., Antman, E. M., & Greenwald, S. (1988). Nonlinear dynamics in sudden cardiac death syndrome: Heart rate oscillations and bifurcations. *Experientia*, 44((11-12)), 983–987.
- Gómez, R. (2000). *El aprendizaje de las habilidades y esquemas motrices en el niño y el joven*. Stadium.
- Gonçalves, C. A., Lopes, T. J. D., Nunes, C., Marinho, D. A., & Neiva, H. P. (2019). Neuromuscular Jumping Performance and Upper-Body Horizontal Power of Volleyball Players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, Publish Ah.  
<https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000003139>
- Gow, B. J., Peng, C. K., Wayne, P. M., & Ahn, A. C. (2015). Multiscale entropy analysis of center-of-pressure dynamics in human postural control: Methodological considerations. *Entropy*, 17(12), 7926–7947. <https://doi.org/10.3390/e17127849>
- Granda Vera, J., & Barbero Álvarez, J. C. (1995). *Variabilidad De Movimiento Y Táctica Deportiva. Un Estudio Aplicado a Situaciones De 1 Contra 1 En Baloncesto*.
- Grassberger, P. (1983). Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal. *Physical Review*, 28(4), 2591–2593.
- Grgantov, Z., Jelaska, I., & Šuker, D. (2018). Intra and interzone differences of attack and counterattack efficiency in elite male volleyball. *Journal of Human Kinetics*, 65(1).  
<https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0028>
- Guo, R., & Li, Y. (1998). *Kinematic Analysis of Spiking in Elite Volleyball Players during Competition*. 1998.
- Gutiérrez, M., Santos, J., & Soto, V. (1992). *Análisis biomecánico del remate en voleibol*. Federación Española de Voleibol.
- Haider, F., Salim, F. A., Postma, D. B. W., van Delden, R., Reidsma, D., van Beijnum, B.-J., & Luz, S. (2020). A Super-Bagging Method for Volleyball Action Recognition Using Wearable Sensors. *Multimodal Technologies and Interaction*, 4(2).  
<https://doi.org/10.3390/mti4020033>
- Haken, H. (1996). *Principles of brain functioning: A synergetic approach to brain activity, behavior and cognition*. Springer.
- Haley, M. (1992). Remate. In *Guía de Voleibol de la Asociación de Entrenadores Americanos de voleibol* (Bertucci.). Paidotribo.
- Hamill, J., Haddad, J., Li, L., Heiderscheit, B., & Van Emmerik, R. (2006). Clinical relevance of coordination variability. In *Variability in the Movement System: A Multi-Disciplinary Perspective*. (pp. 153-166.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Hamilton, G. R., & Reinschmidt, C. (1997). Optimal trajectory for the basketball free throw. *Journal of Sports Sciences*, 15(5), 491–504. <https://doi.org/10.1080/026404197367137>
- Hansen, B., Laughlin, W., Dowling, B., Owen, C., & Fleisig, G. (2019). *Validation of a Two-Sensor*

*Imu System for Measuring Jump Height. October, 28–31.*

- Hansen, C., La Rue, J., Do, M. C., & Latash, M. L. (2016). Postural preparation to stepping: Coupled center of pressure shifts in the anterior-posterior and medio-lateral directions. *Journal of Human Kinetics, 54*(1), 5–14. <https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0030>
- Hansen, C., Wei, Q., Shieh, J. S., Fourcade, P., Isableu, B., & Majed, L. (2017). Sample entropy, univariate, and multivariate multi-scale entropy in comparison with classical postural sway parameters in young healthy adults. *Frontiers in Human Neuroscience, 11*(April). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00206>
- Haran, F. J., & Keshner, E. A. (2008). Sensory reweighting as a method of balance training for labyrinthine loss. *Journal of Neurologic Physical Therapy : JNPT, 32*(4), 186–191. <https://doi.org/10.1097/NPT.0b013e31818dee39>
- Harbourne, R. T., & Stergiou, N. (2009). Movement variability and the use of nonlinear tools: Principles to guide physical therapist practice. *Physical Therapy, 89*(3), 267–282. <https://doi.org/10.2522/ptj.20080130>
- Hauge, E. R., Berle, J. Ø., Oedegaard, K. J., Holsten, F., & Fasmer, O. B. (2011). Nonlinear analysis of motor activity shows differences between schizophrenia and depression: a study using Fourier analysis and sample entropy. *PLoS One, 6*(1), e16291. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016291>
- Hayles, N. K. (1990). *Chaos bound: Orderly disorder un contemporary literature and science*. Cornell University Press.
- Häyrinen, M., Hoivala, T., & Blomqvist, M. (2004). Differences between winning and losing teams in men's European top-level volleyball. In P. O'Donoghue & M. Hughes (Ed.), *Proceedings of VI Conference Performance Analysis, 168–177*.
- Häyrinen, M., Luhtanen, P., & Hoivala, T. (2000). Factors affecting winning in men's international level volleyball. *5th Annual Congress of the European College of Sport Sciences, Jyväskylä, Finland, 19- 22.7.2000, Congress Proceedings, 339*.
- Helten, T., Brock, H., Müller, M., & Seidel, H. P. (2011). Classification of trampoline jumps using inertial sensors. *Sports Engineering, 14*(2–4), 155–164. <https://doi.org/10.1007/s12283-011-0081-4>
- Hernández-Davo, H., Urbán, T., Sarabia, J. M., Juan-Recio, C., & Javier Moreno, F. (2014). Variable training: effects on velocity and accuracy in the tennis serve. *Journal of Sports Sciences, 32*(14), 1383–1388. <https://doi.org/10.1080/02640414.2014.891290>
- Hernández, L. (1992). La técnica. In En COE (Ed). *Voleibol*. (pp. 59–132). C.O.E.
- Hiley, M. J., Zuevsky, V. V., & Yeadon, M. R. (2013). Is skilled technique characterized by high or low variability? An analysis of high bar giant circles. *Human Movement Science, 32*(1), 171–180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.11.007>
- Hong, D. A., Cheung, T. K., & Roberts, E. M. (2001). A three-dimensional, six-segment chain analysis of forceful overarm throwing. *Journal of Electromyography and Kinesiology : Official Journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology, 11*(2), 95–112. [https://doi.org/10.1016/s1050-6411\(00\)00045-6](https://doi.org/10.1016/s1050-6411(00)00045-6)

- Hossain, S. M., Uddin, M. J., Fujimoto, Y., & Toh, S. Y. (2011). The impact of social capital-based selection practices on talent management: evidence from telecom MNCs in Bangladesh. *European Journal of International Management*, 1(1), 1–36. <https://doi.org/10.1504/ejim.2021.10034513>
- Houssay, B. (1989). *Fisiología Humana. Neurofisiología*. Ateneo Editorial.
- Hsieh, C., & Christiansen, C. (2010). The effect of approach on spike jump height for female volleyball players. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 5(3), 373–380. <https://doi.org/10.1260/1747-9541.5.3.373>
- Huang, C.-F., Liu, G.-C., & Sheu, T.-Y. (1998). a Three-Dimensional Analysis of the Volleyball One-Foot Jump Spike. *ISBS - Conference Proceedings Archive*, 196–199. <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/972>
- Huang, K. C., Hu, U. H., & Huang, C. (2002). Kinetic and kinematic differences of two volleyball-spiking jumps. *ISBS, 1990*, 148–151.
- Huang, Y., Chen, T., Chiu, B., Yi, C., Lin, C., Yeh, Y., & Kuo, L. (2012). Calculate Golf Swing Trajectories from IMU Sensing Data. *2012 41st International Conference on Parallel Processing Workshops*, 505–513. <https://doi.org/10.1109/ICPPW.2012.69>
- Huijben, B., van Schooten, K. S., van Dieën, J. H., & Pijnappels, M. (2018). The effect of walking speed on quality of gait in older adults. *Gait & Posture*, 65, 112–116. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.07.004>
- Iglesias, F. A. (1994). Análisis del esfuerzo en el voleibol: final liga mundial 92. (RED) *Revista de Entrenamiento Deportivo*, Tomo VIII, 25–29.
- Ikedo, Y., Sasaki, Y., & Hamano, R. (2017). Factors influencing spike jump height in female college volleyball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(1), 267–273. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000002191>
- Ivoilov, A. (1986). *Voleibol. Técnica, táctica y entrenamiento*. Stadium.
- Jaitner, T., Ebker, G., & Schmidt, M. (2017). Estimation of the Jump Height for the Volleyball Spike By a Mobile Imu Unit. *35th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports, June*, 222–225.
- Jandova, S., & Janura, M. (2019). Jumping performance and take-off efficiency in two different age categories of female volleyball players. *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, 21(2), 55–61.
- Jaric, S., Ferreira, S. M. S., Tortoza, C., Marconi, N. F., & Almeida, G. L. (1999). Effects of displacement and trajectory length on the variability pattern of reaching movements. *Journal of Motor Behavior*, 31(4), 303–308. <https://doi.org/10.1080/00222899909600996>
- Jennings, D., Cormack, S., Coutts, A. J., Boyd, L. J., & Aughey, R. J. (2010). Variability of GPS units for measuring distance in team sport movements. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(4), 565–569. <https://doi.org/10.1123/ijspp.5.4.565>
- Jessell, T. M., R., K. E., & Schwartz, J. H. (1997). *Neurociencia y Conducta*. Prentice Hall.
- Jöris, H. J., van Muyen, A. J., van Ingen Schenau, G. J., & Kemper, H. C. (1985). Force, velocity

- and energy flow during the overarm throw in female handball players. *Journal of Biomechanics*, 18(6), 409–414. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(85\)90275-1](https://doi.org/10.1016/0021-9290(85)90275-1)
- Kabacinski, J., Murawa, M., Dworak, L. B., & Maczinski, J. (2017). Differences in ground reaction forces during landing between volleyball spikes. *Trends in Sport Sciences*, 24(2), 87–92. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=s3h&AN=124037875&site=ehost-live&scope=site>
- Kaipust, J. P., Huisinga, J. M., Filipi, M., & Stergiou, N. (2012). Gait variability measures reveal differences between multiple sclerosis patients and healthy controls. *Motor Control*, 16(2), 229–244. <https://doi.org/10.1123/mcj.16.2.229>
- Kaji, A., Sasagawa, S., Kubo, T., & Kanehisa, H. (2010). Transient Effect of Core Stability Exercises on Postural Sway During Quiet Standing. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 382–388.
- Kao, S. S., Sellens, R. W., & Stevenson, J. M. (1994). A Mathematical Model for the Trajectory of a Spiked Volleyball and its Coaching Application. *Journal of Applied Biomechanics*, 10(2), 95–109. <https://doi.org/10.1123/jab.10.2.95>
- Kautz, T., Groh, B. H., Hannink, J., Jensen, U., Strubberg, H., & Eskofier, B. M. (2017). Activity recognition in beach volleyball using a Deep Convolutional Neural Network. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 31(6), 1678–1705. <https://doi.org/10.1007/s10618-017-0495-0>
- Kelly, D., Coughlan, G. F., Green, B. S., & Caulfield, B. (2012). Automatic detection of collisions in elite level rugby union using a wearable sensing device. *Sports Engineering*, 15(2), 81–92. <https://doi.org/10.1007/s12283-012-0088-5>
- Kelso, J. A. (1995). Dynamic patterns: the self-organization of brain and behavior. In *How Nature Handles Complexity* (Vol. 103, Issue 5, p. 576). [https://doi.org/10.1016/s0013-4694\(97\)00051-5](https://doi.org/10.1016/s0013-4694(97)00051-5)
- Kelso, J., Bergman, L. R., Cairns, R. B., Nilsson, L.-G., & Nystedt, L. (2000). Principles of dynamic pattern formation and change for a science of human behavior. In *Developmental Science and the Holistic Approach*. (pp. 63–68). Lawrence Erlbaum.
- Kloos, H., & Van Orden, G. (2010). Voluntary behavior in cognitive and motor tasks. *Mind and Matter*, 8(1), 19–43.
- Ko, J. H., & Newell, K. M. (2015). Organization of postural coordination patterns as a function of scaling the surface of support dynamics. *Journal of Motor Behavior*, 47, 415–426.
- Ko, Ji Hyun, Han, D.-W., & Newell, K. M. (2018). Skill level changes the coordination and variability of standing posture and movement in a pistol-aiming task. *Journal of Sports Sciences*, 36(7), 809–816. <https://doi.org/10.1080/02640414.2017.1343490>
- Koda, H., Sagawa, K., Kuroshima, K., Tsukamoto, T., Urita, K., & Ishibashi, Y. (2010). 3D measurement of forearm and upper arm during throwing motion using body mounted sensor. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 4(1), 167–178. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.4.167>
- Kos, M., Ženko, J., Vlaj, D., & Kramberger, I. (2016). Tennis stroke detection and classification using miniature wearable IMU device. *International Conference on Systems, Signals, and*

*Image Processing*, 2016-June, 0–3. <https://doi.org/10.1109/IWSSIP.2016.7502764>

- Kovalev, V. S. (1978). Loading the key to jumping in volleyball. *Soviet Sports Review*, 16(2).
- Krabak, B. J., Tenforde, A. S., Davis, I. S., Fredericson, M., Harrast, M. A., d'Hemecourt, P., Luke, A. C., & Roberts, W. O. (2019). Youth Distance Running: Strategies for Training and Injury Reduction. *Current Sports Medicine Reports*, 18(2), 53–59. <https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000564>
- Kudo, K. (2008). Adaptive Variability in Skilled Human. *Transactions of the Japanese Society for Artificial Intelligence*, 3(2), 409–420.
- Kugler, A., Krüger-Franke, M., Reininger, S., Trouillier, H. H., & Rosemeyer, B. (1996). Muscular imbalance and shoulder pain in volleyball attackers. *British Journal of Sports Medicine*, 30(3), 256–259. <https://doi.org/10.1136/bjism.30.3.256>
- Kuhlmann, C. H., Roemer, K., & Milani, T. L. (2011). Lowering velocity of the centre of mass during the approach affects jump height in volleyball spike jumps. 11(1982), 101–104.
- Kuhlmann, C., Roemer, K., & Milani, T. L. (2007). Aspects of a Three Dimensional Motion Analysis of the Volleyball Spike in High Level Competition. *XXV ISBS Symposium, Ouro Preto – Brazil*, 47–50. <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/393>
- Kumar, R., & Kumar, D. A. (2020a). Analysis of Kinematic and Anthropometric Variables of the Spike Execution Technique of Volleyball. *International Journal For Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 7(4), 120–132. <https://doi.org/10.31033/ijrasb.7.4.15>
- Kumar, R., & Kumar, D. A. (2020b). Biomechanical Analysis of Take-off in Spiking Technique of Volleyball Based on Anthropometric and Kinematic Variables. *International Journal For Research in Applied Sciences and Biotechnology*, 7(4), 92–101. <https://doi.org/10.31033/ijrasb.7.4.11>
- Kumar, Y., Dewal, M. L., & Anand, R. S. (2014). Epileptic seizure detection using DWT based fuzzy approximate entropy and support vector machine. *Neurocomputing*, 133, 271–279. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neucom.2013.11.009>
- Kurths, J., Voss, A., Saperin, P., Witt, A., Kleiner, H. J., & Wessel, N. (1995). Quantitative analysis of heart rate variability. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 5(1), 88–94. <https://doi.org/10.1063/1.166090>
- Kuznetsov, N. A., & Wallot, S. (2011). Effects of accuracy feedback on fractal characteristics of time estimation. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 5(October), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fnint.2011.00062>
- Ladislao, L., Rabini, R. A., Ghetti, G., & Fioretti, S. (2008). Approximate entropy on posturographic data of diabetic subjects with peripheral neuropathy. *Gait and Posture*, 28, S6–S7.
- Laffaye, G., Wagner, P. P., & Tombleson, T. I. L. (2014). Countermovement jump height: Gender and sport-specific differences in the force-time variables. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 28(4), 1096–1105. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3182a1db03>
- Lai, S. C., Mayer-Kress, G., Sosnoff, J. J., & Newell, K. M. (2005). Information entropy analysis of discrete aiming movements. *Acta Psychologica*, 119(3), 283–304.

<https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2005.02.005>

- Lake, D. E., Richman, J. S., Pamela Griffin, M., & Randall Moorman, J. (2002). Sample entropy analysis of neonatal heart rate variability. *American Journal of Physiology - Regulatory Integrative and Comparative Physiology*, 283(3 52-3).  
<https://doi.org/10.1152/ajpregu.00069.2002>
- Latash, M. L. (1993). Control of human movement. In *Champaign: Human Kinetics publishers*.
- Latash, Mark L., Ferreira, S. S., Wiczcerek, S. A., & Duarte, M. (2003). Movement sway: Changes in postural sway during voluntary shifts of the center of pressure. *Experimental Brain Research*, 150(3), 314–324. <https://doi.org/10.1007/s00221-003-1419-3>
- Lee, J. B., Mellifont, R. B., & Burkett, B. J. (2010). The use of a single inertial sensor to identify stride, step, and stance durations of running gait. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2), 270–273. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.01.005>
- Lee, J. B., Mellifont, R. B., Burkett, B. J., & James, D. A. (2013). Detection of illegal race walking: A tool to assist coaching and judging. *Sensors (Switzerland)*, 13(12), 16065–16074. <https://doi.org/10.3390/s131216065>
- Lee, Y. S., Ho, C. S., Shih, Y., Chang, S. Y., Róbert, F. J., & Shiang, T. Y. (2015). Assessment of walking, running, and jumping movement features by using the inertial measurement unit. *Gait and Posture*, 41(4), 877–881. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.03.007>
- Lees, A., Vanrenterghem, J., & Clercq, D. De. (2004). Understanding how an arm swing enhances performance in the vertical jump. *Journal of Biomechanics*, 37(12), 1929–1940. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2004.02.021>
- Lenoir, M., Savelsbergh, G. J., Musch, E., Thiery, E., Uyttenhove, J., & Janssens, M. (1999). Intercepting moving objects during self-motion: effects of environmental changes. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 70(4), 349–360. <https://doi.org/10.1080/02701367.1999.10608055>
- Li, P., Liu, C., Liu, C., Wang, X., Li, L., Yang, L., & Chen, Y. (2013). Testing pattern synchronization in coupled systems through different entropy-based measures. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 51(5), 581–591. <https://doi.org/10.1007/s11517-012-1028-z>
- Liao, F., Wang, J., & He, P. (2008). Multi-resolution entropy analysis of gait symmetry in neurological degenerative diseases and amyotrophic lateral sclerosis. *Medical Engineering and Physics*, 30(3), 299–310. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2007.04.014>
- Lin, Y. T., Kuo, C. H., & Hwang, I. S. (2014). Fatigue effect on low-frequency force fluctuations and muscular oscillations during rhythmic isometric contraction. *PLoS ONE*, 9(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085578>
- Lipsitz, L. A. (2002). Dynamics of stability: The physiologic basis of functional health and frailty. *Journals of Gerontology - Series A Biological Sciences and Medical Sciences*, 57(3), 115–125. <https://doi.org/10.1093/gerona/57.3.B115>
- Liu, C., Li, K., Zhao, L., Liu, F., Zheng, D., Liu, C., & Liu, S. (2013). Analysis of heart rate variability using fuzzy measure entropy. *Computers in Biology and Medicine*, 43(2), 100–

108. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2012.11.005>
- Liu, G. C., Huang, G. C., & Huang, C. (2001). Effects of different approach lengths of the last stride on volleyballer run up vertical jump. *Proceedings of XIX International Symposium on Biomechanics in Sports, October*, 120–123. <https://doi.org/10.13140/2.1.2842.4962>
- Liu, S., & Burton, A. W. (1999). *Changes in basketball shooting patterns as a function of distance*. 831–845.
- Lobiatti, R. (2010). Landing techniques in volleyball. *Journal of Sports Sciences*, 28(13), 1469–1476.
- Loffing, F., & Cañal-Bruland, R. (2017). Anticipation in sport. *Current Opinion in Psychology*, 16(16), 6–11. <https://doi.org/10.1016/j.copsyc.2017.03.008>
- Loran, D. F. C., & MacEwen, J. C. (1997). An overview of sport and vision. In *Sports Vision*. Butterworth-Heinemann.
- Lorenz, E. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, 130–141.
- Loud, K. J., Gordon, C. M., Micheli, L. J., & Field, A. E. (2005). Correlates of stress fractures among preadolescent and adolescent girls. *Pediatrics*, 115(4), e399-406. <https://doi.org/10.1542/peds.2004-1868>
- Lucas-Cuevas, A. G., Pérez-Soriano, P., Bush, M., Crossman, A., Llana, S., Cortell-Tormo, J. M., & Pérez-Turpin, J. A. (2013). Effects of different backpack loads in acceleration transmission during recreational distance walking. *Journal of Human Kinetics*, 37(1), 81–89. <https://doi.org/10.2478/hukin-2013-0028>
- Lucas, L. A., England, B. S., Mason, T. W., Lanning, C. R., Miller, T. M., Morgan, A. M., & Almonroeder, T. G. (2018). Decision making influences tibial impact accelerations during lateral cutting. *Journal of Applied Biomechanics*, 34(5), 414–418. <https://doi.org/10.1123/jab.2017-0397>
- MacDonald, K., Bahr, R., Baltich, J., Whittaker, J. L., & Meeuwisse, W. H. (2016). Validation of an inertial measurement unit for the measurement of jump count and height. *Physical Therapy in Sport*, 25, 15–19. <https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2016.12.001>
- Madden, S. (1997). Aumente la velocidad del remate con ejercicios de movimientos del brazo. *Voley*, 87, 137–179.
- Mäkikallio, T. H., Ristimäe, T., Airaksinen, K. E. J., Peng, C. K., Goldberger, A. L., & Huikuri, H. V. (1998). Heart rate dynamics in patients with stable angina pectoris and utility of fractal and complexity measures. *American Journal of Cardiology*, 81(1), 27–31. [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(97\)00799-6](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(97)00799-6)
- Marcelino, R., Mesquita, I., & Afonso, J. (2008). The weight of terminal actions in Volleyball. Contributions of the spike, serve and block for the teams' rankings in the World League 2005. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 8(2), 1–7. <https://doi.org/10.1080/24748668.2008.11868430>
- Marelic, N. ., Zufar, G. ., & Omrcen, D. (1998). Influence of some situation-related parameters on the score in volleyball. *Kinesiology (Zagreb)*, 30 (2), 55-65.

- Marquez, W. Q., Masumura, M., & Ae, M. (2009). The effects of jumping distance on the landing mechanics after a volleyball spike. *Sports Biomechanics*, 8(2), 154–166. <https://doi.org/10.1080/14763140902994435>
- Marquez, W. Q., Masumura, M., & Ae, M. (2011). Spike-landing Motion of Elite Male Volleyball Players during Official Games. *International Journal of Sport and Health Science, advpub*, 1108190078. <https://doi.org/10.5432/ijshs.20100015>
- Marquez, W. Q., Masumura, M., & Ae, M. (2007). A pilot study on how world-class male volleyball players land after a spike. *Proceedings of Podium Sessions, XXI ISB Congress, 2005*, 1–2.
- Masumura, M., Marquez, W. Q., & AE, M. (2009). Front and pipe spikes in female elite volleyball players: implications for the improvement of pipe spike techniques. *ISBS Conference 2009*, 1.
- Masumura, M., Marquez, W. Q., Endo, T., & Ae, M. (2008). A biomechanical analysis of spike motion for elite male volleyball players in official games. *ISBS Conference 2008*, 27(3), 1–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.020><http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.08.019><http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2016.12.015><https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298><http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624>.
- Matijevich, E. S., Branscombe, L. M., Scott, L. R., & Zelik, K. E. (2019). Ground reaction force metrics are not strongly correlated with tibial bone load when running across speeds and slopes: Implications for science, sport and wearable tech. *PLoS ONE*, 14(1), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210000>
- McClenaghan, B. A., & Gallahue, D. L. (1978). *Fundamental movement: A developmental and remedial approach*. Saunders.
- McClenaghan, B., & Gallahue, D. (1985). *Movimientos fundamentales: su desarrollo y rehabilitación*. Medica Panamericana S.A.
- McCughton, H. (1998). *A probabilistic approach to volleyball*. University Brigham Young.
- Mckeen, J., Fullerton, G. S., Mind, S., Series, N., & Jul, N. (1892). The Psychophysics of Movement. *Oxford Journals*, 1(3), 447–452.
- McLellan, C. P., Lovell, D. I., & Gass, G. C. (2011). Performance analysis of elite Rugby League match play using global positioning systems. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 25(6), 1703–1710. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181ddf678>
- McLeod, P. (1987). Visual reaction time and high-speed ball games. *Perception*, 16(1), 49–59.
- McNamara, D., Gabbett, T., & Chapman, P. (2015). The validity of microsensors to automatically detect bowling events and counts in cricket fast bowlers. *International Journal Sports Physiological Performance*, 10, 71–75.
- McNitt-Gray, J. L. (2000). Musculoskeletal Loading During Landing. In *Biomechanics in Sport* (pp. 523–549). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9780470693797.ch25>
- Mehdizadeh, S., Arshi, A. R., & Davids, K. (2015). Quantifying coordination and coordination variability in backward versus forward running: Implications for control of motion. *Gait & Posture*, 42(2), 172–177. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.05.006>

- Menayo, R., Fuentes, J. P., Moreno, F. J., Reina, R., & García, J. A. (2010). Relación entre variabilidad de la práctica y variabilidad en la ejecución del servicio plano en tenis. *Motricidad. European Journal of Human Movement*, 25.
- Menayo, R., Hernández, F. J. M., García, J. P. F., Vaillo, R. R., & Arroyo, J. S. D. (2012). Relationship between motor variability, accuracy, and ball speed in the tennis serve. *Journal of Human Kinetics*, 33, 45–53. <https://doi.org/10.2478/v10078-012-0043-3>
- Mielgo-Ayuso, J., Calleja-González, J., Clemente-Suárez, V. J., & Zourdos, M. C. (2015). Influence of anthropometric profile on physical performance in elite female volleyballers in relation to playing position. *Nutrición Hospitalaria: Organo Oficial de La Sociedad Española de Nutrición Parenteral y Enteral*, 31(2), 849–857. <https://doi.org/10.3305/nh.2015.31.2.7658>
- Milić, M., Grgantov, Z., Chamari, K., Ardigò, L. P., Bianco, A., & Padulo, J. (2017). Anthropometric and physical characteristics allow differentiation of young female volleyball players according to playing position and level of expertise. *Biology of Sport*, 34(1), 19–26. <https://doi.org/10.5114/biolsport.2017.63382>
- Miller, D. J., Stergiou, N., & Kurz, M. J. (2006). An improved surrogate method for detecting the presence of chaos in gait. *Journal of Biomechanics*, 39(15), 2873–2876. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2005.10.019>
- Miller, S. (2002). *Variability in basketball shooting: Practical implications*.
- Milner, C. E., Hawkins, J. L., & Aubol, K. G. (2019). Tibial acceleration during running is higher in field testing than indoor testing. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 52(6), 1361–1366. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000002261>
- Mitchinson, L., Campbell, A., Oldmeadow, D., Gibson, W., & Hopper, D. (2013). Comparison of upper arm kinematics during a volleyball spike between players with and without a history of shoulder injury. *Journal of Applied Biomechanics*, 29(2), 155–164. <https://doi.org/10.1123/jab.29.2.155>
- Mitra, S., Amazeen, P. G., & Turvey, M. T. (1998). Intermediate motor learning as decreasing active (dynamical) degrees of freedom. *Human Movement Science*, 17, 17–65.
- Montgomery, P. G., Pyne, D. B., & Minahan, C. L. (2010). The physical and physiological demands of basketball training and competition. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 5(1), 75–86. <https://doi.org/10.1123/ijssp.5.1.75>
- Montoro, F. (2015). *Estudio de la capacidad de salto específico en voleibol* [Universidad de Málaga]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=152422>
- Moon, Y., Sung, J., An, R., Hernandez, M. E., & Sosnoff, J. J. (2016). Gait variability in people with neurological disorders: A systematic review and meta-analysis. *Human Movement Science*, 47, 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.03.010>
- Moras, G., Fernández-Valdés, B., Vázquez-Guerrero, J., Tous-Fajardo, J., Exel, J., & Sampaio, J. (2018). Entropy measures detect increased movement variability in resistance training when elite rugby players use the ball. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(12), 1286–1292. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2018.05.007>

- Moras, G., & López, D. (1995). Relación entre diferentes tests de salto en voleibol utilizando la plataforma de Bosco. *Apunts Medicina de l'Esport*, 32(124), 119–129. [https://doi.org/10.1016/S1886-6581\(95\)75858-3](https://doi.org/10.1016/S1886-6581(95)75858-3)
- Moreno, F. J., & Ordoño, E. M. (2009). Aprendizaje motor y síndrome general de adaptación. *Motricidad. European Journal of Human Movement*, 1–19.
- Moresi, M., Meara, D. O., & Graham, K. (2013). Quantifying Mechanical Loading During Training in Track Athletes. *ISBS-Conference Proceedings Archive*.
- Morriss, C., Bartlett, R., & Fowler, N. (1997). Biomechanical analysis of the men's javelin throw at the 1995 World Championships in Athletics. In *New Studies in Athletics, IAAF Quarterly* (Vol. 12, Issues 2–3, pp. 31–41).
- Moutinho, C. (2001). *Estudo da estrutura interna das acções da distribuição em equipas de Voleibol de alto nível de rendimento. Contributo para a caracterização e prospectiva do jogador distribuidor*. University of Oporto, Portugal.
- Müller, S., & Abernethy, B. (2012). Expert anticipatory skill in striking sports: A review and a model. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 83(2), 175–187. <https://doi.org/10.1080/02701367.2012.10599848>
- Myers, S. A., Pipinos, I. I., Johanning, J. M., & Stergiou, N. (2011). Gait variability of patients with intermittent claudication is similar before and after the onset of claudication pain. *Clinical Biomechanics*, 26(7), 729–734. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2011.03.005>
- Nettleton, B. (1979). Attention demands of ball-tracking skills. *Perceptual and Motor Skills*, 49(2), 531–534. <https://doi.org/10.2466/pms.1979.49.2.531>
- Newell, A. C., Passot, T., & Lega, J. (1993). Order parameter equations for patterns. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 25(1), 399–453. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.25.010193.002151>
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. *Motor Development in Children: Aspects of Coordination and Control*, 34, 341–360.
- Newell, K. M., & Carlton, L. G. (1988). Force variability in isometric responses. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(1), 37–44.
- Newell, K. M., & Carlton, L. G. (1985). On the relationship between peak force and peak force variability in isometric tasks. *Journal of Motor Behavior*, 17(2), 230–241. <https://doi.org/10.1080/00222895.1985.10735346>
- Newell, K. M., & Vaillancourt, D. E. (2001). Dimensional change in motor learning. *Human Movement Science*, 20(4–5), 695–715. [https://doi.org/10.1016/s0167-9457\(01\)00073-2](https://doi.org/10.1016/s0167-9457(01)00073-2)
- Newell, Karl M. (1998). Degrees of freedom and the development of postural center of pressure profiles. In *Applications of nonlinear dynamics to developmental process modeling* (pp. 63–84). Lawrence Erlbaum.
- Newell, Karl M., Broderick, M. P., Deutsch, K. M., & Slifkin, A. B. (2003). Task Goals and Change in Dynamical Degrees of Freedom with Motor Learning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(2), 379–387. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.2.379>

- Newell, Karl M. (1986). Constraints on the development of coordination. In *Motor Development in children: Aspects of Coordination and Control* (pp. 341–360). Martinus Nijhoff Publishers.
- Oliveira, L. dos S., Moura, T. B. M. A., Rodacki, A. L. F., Tilp, M., & Okazaki, V. H. A. (2020). A systematic review of volleyball spike kinematics: Implications for practice and research. *International Journal of Sports Science & Coaching*, *15*(2), 239–255. <https://doi.org/10.1177/1747954119899881>
- Orellana, J., & Torres, B. (2010). La entropía y la irreversibilidad temporal multiescala en el análisis de sistemas complejos en fisiología humana. *Revista Andaluza de Medicina Del Deporte*, *43*(2S), 176.
- Oudejans, R. R. D., Michaels, C. F., & Barker, F. C. (1997). The effects of baseball experience on movement initiation in catching fly balls. *Journal of Sports Sciences*, *15*(6), 587–595. <https://doi.org/10.1080/026404197367029>
- Pääsuke, M., Ereline, J., & Gapeyeva, H. (2001). Knee extension strength and vertical jumping performance in nordic combined athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *41*(3), 354–361.
- Padial, P. (1994). *Influencia de la reducción del tiempo de apoyo en la eficacia de la aplicación de la fuerza explosiva. Su entrenamiento*. Universidad de Granada.
- Palao, J. M., Santos, J. A., & Ureña, A. (2004). Effect of team level on skill performance in volleyball. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, *4*(2), 50–60. <https://doi.org/10.1080/24748668.2004.11868304>
- Panchuk, D., Davids, K., Sakadjian, A., Macmahon, C., & Parrington, L. (2013). Did you see that? Dissociating advanced visual information and ball flight constrains perception and action processes during one-handed catching. *Acta Psychologica*, *142*(3), 394–401. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2013.01.014>
- Pastuszak, A., Buško, K., & Kalka, E. (2016). Somatotype and body composition of volleyball players and untrained female students - Reference group for comparison in sport. *Anthropological Review*, *79*(4), 461–470. <https://doi.org/10.1515/anre-2016-0033>
- Pataky, T. C., Robinson, M. A., & Vanrenterghem, J. (2013). Vector field statistical analysis of kinematic and force trajectories. *Journal of Biomechanics*, *46*(14), 2394–2401. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.07.031>
- Paz, G. A., Gabbett, T. J., Maia, M. F., Santana, H., Miranda, H., & Lima, V. (2017). Physical performance and positional differences among young female volleyball players. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, *57*(10), 1282–1289. <https://doi.org/10.23736/S0022-4707.16.06471-9>
- Peng, H. Te, Song, C. Y., Wallace, B. J., Kernozek, T. W., Wang, M. H., & Wang, Y. H. (2019). Effects of Relative Drop Heights of Drop Jump Biomechanics in Male Volleyball Players. *International Journal of Sports Medicine*, *40*(13), 863–870. <https://doi.org/10.1055/a-0969-8623>
- Perez, M. A., & Nussbaum, M. A. (2006). Posture and motion variability in non-repetitive manual materials handling tasks. *Human Movement Science*, *25*(3), 409–421.

<https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.02.003>

- Petrakis, E. (1981). Relationship between figure-ground perception and viewing time in a ball-catching task. *Perceptual and Motor Skills*, 53(3), 899–904.  
<https://doi.org/10.2466/pms.1981.53.3.899>
- Picerno, P., Camomilla, V., & Capranica, L. (2011). Countermovement jump performance assessment using a wearable 3D inertial measurement unit. *Journal of Sports Sciences*, 29(2), 139–146. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.523089>
- Piggott, B. (2008). The relationship between training load and incidence of injury and illness over a pre-season at an Australian Football League Club [Edith Cowan University]. In *The Grants Register 2021*. [https://doi.org/10.1057/978-1-349-95988-4\\_335](https://doi.org/10.1057/978-1-349-95988-4_335)
- Pincus, S. (1995). Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure. *Chaos*, 5(1), 110–117.  
<https://doi.org/10.1063/1.166092>
- Pincus, S.M. (1991). Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88(6), 2297–2301.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.88.6.2297>
- Pincus, Steven M., & Huang, W.-M. (1992). Approximate Entropy: Statistical properties and Applications. *Communications in Statistics - Theory and Methods*, 21(11), 3061–3077.  
<https://doi.org/10.1080/03610920701632080>
- Pion, J. A., Fransen, J., Deprez, D. N., Segers, V. I., Vaeyens, R., Philippaerts, R. M., & Lenoir, M. (2015). Stature and jumping height are required in female volleyball, but motor coordination is a key factor for future elite success. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(6), 1480–1485. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000778>
- Pion, J., Fransen, J., Deprez, D., Segers, V., Vaeyens, R., Philippaerts, R., & Lenoir, M. (2015). Stature and Jumping Height are Required in Female Volleyball, but Motor Coordination is a Key Factor for Future Elite Success. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(6), 1480–1485.
- Piras, A., Lobiatti, R., & Squatrito, S. (2010). A study of saccadic eye movement dynamics in volleyball: comparison between athletes and non-athletes. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 50(1), 99–108.
- Piras, A., Lobiatti, R., & Squatrito, S. (2014). Response time, visual search strategy, and anticipatory skills in volleyball players. *Journal of Ophthalmology*, 2014.  
<https://doi.org/10.1155/2014/189268>
- Plasqui, G., & Westerterp, K. R. (2007). Physical activity assessment with accelerometers: An evaluation against doubly labeled water. *Obesity*, 15(10), 2371–2379.  
<https://doi.org/10.1038/oby.2007.281>
- Poulton, E. C. (1957). On prediction in skilled movements. *Psychological Bulletin*, 54, 467-478.
- Powers, M. E. (1996). Vertical jump training for volleyball. *Strength and Conditioning*, 18–23.
- Preatoni, E. (2007). *Innovative methods for the analysis of sports movements and for the longitudinal monitoring of individual motor skills*. Politecnico di Milano.

- Preatoni, E., Ferrario, M., Donà, G., Hamill, J., & Rodano, R. (2010). Motor variability in sports: a non-linear analysis of race walking. *Journal of Sports Sciences*, 28(12), 1327–1336. <https://doi.org/10.1080/02640414.2010.507250>
- Preatoni, E., Hamill, J., Harrison, A. J., Hayes, K., van Emmerik, R. E. A., Wilson, C., & Rodano, R. (2013). Movement variability and skills monitoring in sports. *Sports Biomechanics*, 12(2), 69–92. <https://doi.org/10.1080/14763141.2012.738700>
- Prigogine, I., & Stengersova, I. (1984). *Order out of chaos: Man's new dialogue with nature*. Bantam Books.
- Quagliarella, L., Ivio, Q., Asanelli, N., Icola, S., Elgiovine, G., Iuseppe, B., Oretti, L., & Orenzo, M. (2010). Evaluation of Standing Vertical Jump. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(5), 1229–1236.
- Quagliarella, L., Sasanelli, N., Belgiovine, G., & Cutrone, N. (2006). Flying time evaluation in standing vertical jump by measurement of ankle accelerations. *SIAMOC 2006 Congress Gait & Posture*, 24, S55--S56. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2006.09.072>
- Rabinovich, M. I., & Abarbanel, H. D. I. (1998). The role of chaos in neural systems. *Neuroscience*, 87(1), 5–14. [https://doi.org/10.1016/S0306-4522\(98\)00091-8](https://doi.org/10.1016/S0306-4522(98)00091-8)
- Raffalt, P. C., McCamley, J., Denton, W., & Yentes, J. M. (2019). Sampling frequency influences sample entropy of kinematics during walking. *Medical and Biological Engineering and Computing*, 57(4), 759–764. <https://doi.org/10.1007/s11517-018-1920-2>
- Ramos, A. (2016). *O jogo de Voleibol enquanto um Sistema Dinâmico : Estudo da variabilidade dos comportamentos táticos de equipas femininas de nível de rendimento distinto O jogo de Voleibol enquanto um Sistema Dinâmico : Estudo da variabilidade dos comportamentos táticos* (Issue January). Universidad de Oporto.
- Ramos, A., Coutinho, P., Ribeiro, J., Fernandes, O., Davids, K., & Mesquita, I. (2020). Increasing tactical complexity to enhance the synchronisation of collective behaviours: An action-research study throughout a competitive volleyball season. *Journal of Sports Sciences*, 38(22), 2611–2619. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1794265>
- Ramos, A., Coutinho, P., Silva, P., Davids, K., & Mesquita, I. (2017a). Entropy measures reveal collective tactical behaviours in volleyball teams: how variability and regularity in game actions influence competitive rankings and match status. *International Journal of Performance Analysis in Sport*, 17(6), 848–862. <https://doi.org/10.1080/24748668.2017.1405611>
- Ramos, A., Coutinho, P., Silva, P., Davids, K., & Mesquita, I. (2017b). How players exploit variability and regularity of game actions in female volleyball teams. *European Journal of Sport Science*, 17(4), 473–481. <https://doi.org/10.1080/17461391.2016.1271459>
- Raper, D. P., Witchalls, J., Philips, E. J., Knight, E., Drew, M. K., & Waddington, G. (2018). Use of a tibial accelerometer to measure ground reaction force in running: A reliability and validity comparison with force plates. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(1), 84–88. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.06.010>
- Reeser, J. C., Verhagen, E., Briner, W. W., Askeland, T. I., & Bahr, R. (2006). Strategies for the prevention of volleyball related injuries. *British Journal of Sports Medicine*, 40(7), 594–599.

<https://doi.org/10.1136/bjsem.2005.018234>

- Reeser, Jonathan C, Fleisig, G. S., Bolt, B., & Ruan, M. (2010). Upper limb biomechanics during the volleyball serve and spike. *Sports Health*, 2(5), 368–374.  
<https://doi.org/10.1177/1941738110374624>
- Rezek, I. A., & Roberts, S. J. (1998). Stochastic complexity measures for physiological signal analysis. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 45(9), 1186–1191.  
<https://doi.org/10.1109/10.709563>
- Rice, E. L., & Anderson, K. L. (1994). Volleyball. In *Sports injuries: Mechanisms, prevention and treatment* (pp. 689–700). Williams & Williams.
- Richards, D. P., Ajemian, S. V., Wiley, J. P., Brunet, J. A., & Zernicke, R. F. (2002). Relation between ankle joint dynamics and patellar tendinopathy in elite volleyball players. *Clinical Journal of Sport Medicine*, 12(5), 266–272. <https://doi.org/10.1097/00042752-200209000-00002>
- Richards, D. P., Ajemian, S. V., Wiley, J. P., & Zernicke, R. F. (1996). Knee joint dynamics predict patellar tendinitis in elite volleyball players. *American Journal of Sports Medicine*, 24(5), 676–683. <https://doi.org/10.1177/036354659602400520>
- Richardson, A. K., Mitchell, A. C. S., & Hughes, G. (2018). The effect of movement variability on putting proficiency during the golf putting stroke. *International Journal of Sports Science and Coaching*, 13(4), 590–597. <https://doi.org/10.1177/1747954118768234>
- Richman, J. S., & Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy maturity in premature infants Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *American Journal of Physiology Heart and Circulatory Physiology*, 278, H2039–H2049.
- Riley, M. A., & Turvey, M. T. (2002). Variability and determinism in motor behavior. *Journal of Motor Behavior*, 34(2), 99–125. <https://doi.org/10.1080/00222890209601934>
- Ripoll, H., & Latiri, I. (1997). Effect of expertise on coincident-timing accuracy in a fast ball game. *Journal of Sports Sciences*, 15(6), 573–580.  
<https://doi.org/10.1080/026404197367001>
- Robins, R., Wheat, J., Irwin, G., & Bartlett, R. M. (2006). The effect of shooting distance on movement variability in Basketball. *Journal of Human Movement Studies*, 217–238.
- Roerdink, M., De Haart, M., Daffertshofer, A., Donker, S. F., Geurts, A. C. H., & Beek, P. J. (2006). Dynamical structure of center-of-pressure trajectories in patients recovering from stroke. *Experimental Brain Research*, 174(2), 256–269.  
<https://doi.org/10.1007/s00221-006-0441-7>
- Rokito, A. S., Jobe, F. W., Pink, M. M., Perry, J., & Brault, J. (1998). Electromyographic analysis of shoulder function during the volleyball serve and spike. *Journal of Shoulder and Elbow Surgery*, 7(3), 256–263. [https://doi.org/10.1016/s1058-2746\(98\)90054-4](https://doi.org/10.1016/s1058-2746(98)90054-4)
- Ruiz Pérez, L. (1994). *Desarrollo motor y actividades físicas*. Gymnos.
- Ruiz Pérez, L., Navarro, F., Gutiérrez, M., Graupera, J., & Linaza, J. (2001). *Desarrollo, comportamiento motor y deporte*. Síntesis.

- Sabido, R., Carla, S., Sánchez, C., Javier, F., Hernández, M., & Solana, R. S. (2009). Analysis of the variability of three-points throwing tasks in basketball. *International Journal of Sport Science*. <https://doi.org/10.5232/ricyde2009.017.06>
- Sabuncu, M. R. (2006). *Entropy-based Image Registration* [Princeton University]. [http://people.csail.mit.edu/msabuncu/thesis/Sabuncu\\_thesis.pdf](http://people.csail.mit.edu/msabuncu/thesis/Sabuncu_thesis.pdf)
- Salci, Y., Kentel, B. B., Heycan, C., Akin, S., & Korkusuz, F. (2004). Comparison of landing maneuvers between male and female college volleyball players. *Clinical Biomechanics*, 19(6), 622–628. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2004.03.006>
- Salim, F. A., Haider, F., Yengec Tasdemir, S. B., Naghashi, V., Tengiz, I., Cengiz, K., Postma, D. B. W., Van Delden, R., & Reidsma, D. (2019). Volleyball Action Modelling for Behavior Analysis and Interactive Multi-modal Feedback. *Proceedings ENterface'19*.
- Sampaio, J., & Maças, V. (2012). Measuring tactical behaviour in football. *International Journal of Sports Medicine*, 33(5), 395–401. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1301320>
- Sanderson, F. H., Cockerill, I. M., & MacGillivray, W. W. (1981). Visual acuity and sports performance. In *Vision and Sport*. Stanley Thoemes Publishers.
- Santarcangelo, E. L., Scattina, E., Carli, G., Balocchi, R., Macerata, A., & Manzoni, D. (2009). Modulation of the postural effects of cognitive load by hypnotizability. *Experimental Brain Research*, 194(2), 323–328. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-1740-6>
- Santos, J. A. (1992). *Estudio de las variaciones en el rendimiento de los equipos de voleibol de elite a través de la información obtenida mediante un sistema estadístico informatizado*. Universidad de Granada.
- Sardinha, L., & Bootsma, R. J. (1993). A perception-action approach the study of the volleyball spike. *Motricidade Humana*, 9(2), 5–29.
- Sarvestan, J., Svoboda, Z., & Linduška, P. (2020). Kinematic differences between successful and faulty spikes in young volleyball players. *Journal of Sports Sciences*, 38(20), 2314–2320. <https://doi.org/10.1080/02640414.2020.1782008>
- Sattler, T., Hadžić, V., Dervišević, E., & Markovic, G. (2015). Vertical jump performance of professional male and female volleyball players: effects of playing position and competition level. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(6), 1486–1493. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000000781>
- Savelsbergh, G. J. P., & Bootsma, R. J. (1994). Perception-Action coupling in hitting and catching. *International Journal of Sport Psychology*, 25, 331–343.
- Schafle, M. D. (1993). Common Injuries in Volleyball. treatment, prevention and Rehabilitation. *Sports Medicine*, 16(2), 126–129.
- Schmidt, R A, Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn, J. T. J. (1979). Motor-output variability: a theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 47(5), 415–451.
- Schmidt, Richard A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. In *Psychological Review* (Vol. 82, Issue 4, pp. 225–260). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/h0076770>

- Schmit, J. M., Riley, M. A., Dalvi, A., Sahay, A., Shear, P. K., Shockley, K. D., & Pun, R. Y. K. (2006). Deterministic center of pressure patterns characterize postural instability in Parkinson's disease. *Experimental Brain Research*, 168(3), 357–367. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0094-y>
- Scholz, J. P., Schoner, G., & Latash, M. L. (2000). Identifying the control structure of multijoint coordination during pistol shooting. *Experimental Brain Research*, 135(3), 382–404. <https://doi.org/10.1007/s002210000540>
- Schorer, J., Baker, J., Fath, F., & Jaitner, T. (2007). Identification of interindividual and intraindividual movement patterns in handball players of varying expertise levels. *Journal of Motor Behavior*, 39, 409–421.
- Scott Kelso, J. A., & Engstrom, D. A. (2006). *The Complementary Nature*.
- Seifert, L., Komar, J., Barbosa, T., Toussaint, H., Millet, G., & Davids, K. (2014). Coordination Pattern Variability Provides Functional Adaptations to Constraints in Swimming Performance. *Sports Medicine*, 44(10), 1333–1345. <https://doi.org/10.1007/s40279-014-0210-x>
- Selinger, A., & Ackerman, J. (1987). *Arie Selinger's power volleyball*. St. Martin.
- Seminati, E., Marzari, A., Vacondio, O., & Minetti, A. E. (2015). Shoulder 3D range of motion and humerus rotation in two volleyball spike techniques: injury prevention and performance. *Sports Biomechanics*, 14(2), 216–231. <https://doi.org/10.1080/14763141.2015.1052747>
- Serrien, B., Clijse, R., Blondeel, J., Goossens, M., & Baeyens, J.-P. (2015). Differences in ball speed and three-dimensional kinematics between male and female handball players during a standing throw with run-up. *BMC Sports Science, Medicine & Rehabilitation*, 7, 27. <https://doi.org/10.1186/s13102-015-0021-x>
- Serrien, B., Goossens, M., & Baeyens, J. P. (2018). Proximal-to-distal sequencing and coordination variability in the volleyball spike of elite youth players: Effects of gender and growth. *Journal of Motor Learning and Development*, 6(2), 250–266. <https://doi.org/10.1123/jmld.2017-0049>
- Serrien, B., Ooijen, J., Goossens, M., & Baeyens, J.-P. (2016a). A Motion Analysis in the Volleyball Spike - Part 1: Three-dimensional Kinematics and Performance. *International Journal of Human Movement and Sports Sciences*, 4(4), 70–82. <https://doi.org/10.13189/saj.2016.040403>
- Serrien, B., Ooijen, J., Goossens, M., & Baeyens, J.-P. (2016b). A Motion Analysis in the Volleyball Spike - Part 2: Coordination and Performance Variability. *International Journal of Human Movement and Sports Sciences*, 4(4), 83–90. <https://doi.org/10.13189/saj.2016.040404>
- Shahbazi, M. M., & Mirabedi, A. (2008). Correlations between jump height and velocity components of different approach strides in power spiking. *Proceedings of: XXVI Symposium of the International Society of Biomechanics in Sport*, 600–602.
- Shahbazi, M. M., Mirabedi, A., & Gaeni, A. A. (2007). The Volleyball Approach: An Exploration of Run-Up Last Stride Length with Height and Deviation in Landing. *XXV Annual*

*Symposium of the International Society of Biomechanics in Sports (ISBS).*, 574–577.

- Shank, M. D., & Haywood, K. M. (1987). Eye movements while viewing a baseball pitch. *Perceptual and Motor Skills*, 64(3 II), 1191–1197. <https://doi.org/10.2466/pms.1987.64.3c.1191>
- Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 323–379.
- Sharp, R. H., & Whiting, H. T. (1974). Exposure and occluded duration effects in a ball-catching skill. *Journal of Motor Behavior*, 6(3), 139–147. <https://doi.org/10.1080/00222895.1974.10734990>
- Sheppard, J. M., Cronin, J. B., Gabbett, T. J., McGuigan, M. R., Etxebarria, N., & Newton, R. U. (2008). Relative Importance of Strength, power, and anthropometric measures to jump performance of elite volleyball players. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(3), 758–765.
- Sheppard, J. M., Gabbett, T. J., & Stanganelli, L. C. R. (2009). An analysis of playing positions in elite men's volleyball: Considerations for competition demands and physiologic characteristics. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(6), 1858–1866. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181b45c6a>
- Sheppard, J. M., Gabbett, T., Taylor, K. L., Dorman, J., Lebedew, A. J., & Borgeaud, R. (2007). Development of a repeated-effort test for elite men's volleyball. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2(3), 292–304. <https://doi.org/10.1123/ijssp.2.3.292>
- Sherwood, D. E., & Schmidt, R. A. (1980). The relationship between force and force variability in minimal and near-maximal static and dynamic contractions. *Journal of Motor Behavior*, 12(1), 75–89. <https://doi.org/10.1080/00222895.1980.10735208>
- Sherwood, D. E., Schmidt, R. A., & Walter, C. B. (1988). The force/force-variability relationship under controlled temporal conditions. *Journal of Motor Behavior*, 20(2), 106–116. <https://doi.org/10.1080/00222895.1988.10735436>
- Sillero, M. (2002). *La Percepción De Trayectorias Como Tarea Visual. Propuesta De Evaluación En Fútbol*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Silva, C. C., Teixeira, A. S., & Goldberg, T. B. L. (2003). Sport and its implications on the bone health of adolescent athletes. *Revista Brasileira de Medicina Do Esporte*, 9(6), 426–438. <http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&CSC=Y&NEWS=N&PAGE=fulltext&D=emed9&AN=38180981>
- Sinsurin, K., Srisangboriboon, S., & Vachalathiti, R. (2017). Side-to-side differences in lower extremity biomechanics during multi-directional jump landing in volleyball athletes. *European Journal of Sport Science*, 17(6), 699–709. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1308560>
- Skazalski, C., Whiteley, R., & Bahr, R. (2018). High jump demands in professional volleyball-large variability exists between players and player positions. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 28(11), 2293–2298. <https://doi.org/10.1111/sms.13255>
- Slifkin, A. B., & Newell, K. M. (1999). Noise, information transmission, and force variability.

- Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(3), 837–851. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.25.3.837>
- Smith, D. J., Roberts, D., & Watson, B. (1992). Physical, physiological and performance differences between canadian national team and universiade volleyball players. *Journal of Sports Sciences*, 10(2), 131–138. <https://doi.org/10.1080/02640419208729915>
- Smith, M. D., & Chamberlin, C. J. (1992). Effect of adding cognitively demanding tasks on soccer skill performance. *Perceptual and Motor Skills*, 75(3 Pt 1), 955–961. <https://doi.org/10.2466/pms.1992.75.3.955>
- Stankovic, M., Ruiz-Llamas, G., Perivć, D., & Quiroga-Escudero, M. E. (2019). Point-scoring plays related to level of set win and in-game role during volleyball rules testing. *Journal of Human Sport and Exercise*, 14(1), 86–98. <https://doi.org/10.14198/jhse.2019.141.07>
- Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: Is there a connection? *Human Movement Science*, 30(5), 869–888. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2011.06.002>
- Stergiou, N., Harbourne, R. T., & Cavanaugh, J. T. (2006). Optimal movement variability: A new theoretical perspective for neurologic physical therapy. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, 30(3), 120–129. <https://doi.org/10.1097/01.NPT.0000281949.48193.d9>
- Stins, J. F., Michielsen, M. E., Roerdink, M., & Beek, P. J. (2009). Sway regularity reflects attentional involvement in postural control: effects of expertise, vision and cognition. *Gait & Posture*, 30(1), 106–109. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.04.001>
- Stodden, D. F., Fleisig, G. S., McLean, S. P., & Andrews, J. R. (2005). Relationship of biomechanical factors to baseball pitching velocity: within pitcher variation. *Journal of Applied Biomechanics*, 21(1), 44–56. <https://doi.org/10.1123/jab.21.1.44>
- Stone, J. A., Maynard, I. W., North, J. S., Panchuk, D., & Davids, K. (2014). (De)synchronization of advanced visual information and ball flight characteristics constrains emergent information–movement couplings during one-handed catching. *Experimental Brain Research*, 233(2), 449–458. <https://doi.org/10.1007/s00221-014-4126-3>
- Strogatz, S. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. MA: Westview Press.
- Suda, E. Y., Matias, A. B., Bus, S. A., & Sacco, I. C. N. (2019). Impact of diabetic neuropathy severity on foot clearance complexity and variability during walking. *Gait and Posture*, 74(August 2018), 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.09.014>
- Tabor, P., Urbanik, C., & Mastalerz, A. (2018). Direction and Velocity of the Ball in Volleyball Spike Depending on Location on Court. *Polish Journal of Sport and Tourism*, 25(4), 3–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/pjst-2018-0020>
- Tenforde, A. S., & Fredericson, M. (2011). Influence of sports participation on bone health in the young athlete: a review of the literature. *PM & R: The Journal of Injury, Function, and Rehabilitation*, 3(9), 861–867. <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2011.05.019>
- Teufl, W., Miezal, M., Taetz, B., Fröhlich, M., & Bleser, G. (2019). Validity of inertial sensor based 3D joint kinematics of static and dynamic sport and physiotherapy specific

- movements. *PLoS One*, 14(2), e0213064. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213064>
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge: MIT press.
- Thuraisingham, R. A., & Gottwald, G. A. (2006). On multiscale entropy analysis for physiological data. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 366, 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2005.10.008>
- Tillman, M. D., Hass, C. J., Brunt, D., & Bennett, G. R. (2004). Jumping and landing techniques in elite women's volleyball. *Journal of Sports Science and Medicine*, 3(1), 30–36.
- Tilp, M., Wagner, H., & Müller, E. (2008). Differences in 3D kinematics between volleyball and beach volleyball spike movements. *Sports Biomechanics*, 7(3), 386–397. <https://doi.org/10.1080/14763140802233231>
- Tirosh, O., Orland, G., Eliakim, A., Nemet, D., & Steinberg, N. (2017). Tibial impact accelerations in gait of primary school children: The effect of age and speed. *Gait and Posture*, 57(February), 265–269. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2017.06.270>
- Tözeren, A. (2000). Human Body Dynamics. In *Springer* (Vol. 87, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/s0031-9406\(05\)60479-8](https://doi.org/10.1016/s0031-9406(05)60479-8)
- Tresilian, J. R. (2004). The accuracy of interceptive action in time and space. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 32(4), 167–173. <https://doi.org/10.1097/00003677-200410000-00008>
- Tsai, Y.-J., & Chia, C.-C. (2018). Landing Kinematics, Sports Performance and Isokinetic Strength in Adolescent Male Volleyball Athletes: Influence of Core Training. *Journal of Sport Rehabilitation*, 29(1), 65–72.
- Turvey, M. T. (1996). Dynamic touch. *American Psychologist*, 51(11), 1134–1152.
- Umek, A., & Kos, A. (2020). Sensor system for augmented feedback applications in volleyball. *Procedia Computer Science*, 174, 369–374. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.06.101>
- Urbán, T., Gutiérrez, Ó., & Moreno, F. J. (2015). Effects of Unstable Conditions on Kinematics and Performance Variables in Young Handball Players. *Journal of Human Kinetics*, 46, 39–48. <https://doi.org/10.1515/hukin-2015-0032>
- Urbán, T., Hernández-Davó, H., & Moreno, F. J. (2012). Variabilidad cinemática en relación con el rendimiento en el saque en jóvenes tenistas. *Motricidad. European Journal of Human Movement*, 29, 49–60.
- Ureña, A. (1998). *Incidencia de la función ofensiva sobre el rendimiento de la recepción del saque en voleibol*. Universidad de Granada.
- Vaillancourt, D. E., & Newell, K. M. (2002). Changing complexity in human behavior and physiology through aging and disease. *Neurobiology of Aging*, 23(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/s0197-4580\(01\)00247-0](https://doi.org/10.1016/s0197-4580(01)00247-0)
- Valadés Cerrato, D. (2005). Efecto de un entrenamiento en el tren superior basado en el CEA sobre la velocidad del balón en el remate de voleibol. In *Educación Física y deportiva*.

Universidad de Granada.

- Valadés Cerrato, D., Palao, Andrés, J. M., & Bermejo Frutos, J. (2013). Mechanics of the Spike Execution in Volleyball. *Movimiento Humano*, 5, 33–51.
- Valadés Cerrato, D., Palao, J. M., Aúnsolo, Á., & Ureña, A. (2016). Correlation between ball speed of the spike and the strength condition of a professional women's volleyball team during the season. *Kinesiology*, 48(1), 87–94. <https://doi.org/10.26582/k.48.1.7>
- Van den Berghe, P., Six, J., Gerlo, J., Leman, M., & De Clercq, D. (2019). Validity and reliability of peak tibial accelerations as real-time measure of impact loading during over-ground rearfoot running at different speeds. *Journal of Biomechanics*, 86, 238–242. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.01.039>
- Van Emmerik, R. E. A., & Van Wegen, E. E. H. (2002). On the functional aspects of variability in postural control. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 30(4), 177–183. <https://doi.org/10.1097/00003677-200210000-00007>
- Van Orden, G. (2010). Voluntary performance. *Medicina*, 46(9), 581–594. <https://doi.org/10.3390/medicina46090083>
- Vaverka, F., Jandačka, D., Zahradník, D., Uchytíl, J., Farana, R., Supej, M., & Vodičar, J. (2016). Effect of an Arm Swing on Countermovement Vertical Jump Performance in Elite Volleyball Players: FINAL. *Journal of Human Kinetics*, 53(1), 41–50. <https://doi.org/10.1515/hukin-2016-0009>
- Vereijken, B., Emmerik, R. E. A., Whiting, H. T. A., & Newell, K. M. (1992). Free(z)ing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 24(1), 133–142. <https://doi.org/10.1080/00222895.1992.9941608>
- Vickers, J. N. (1992). Gaze control in putting. *Perception*, 21(1), 117–132. <https://doi.org/10.1068/p210117>
- Vint, P. (1995). Secrets of speed—An in-depth look at spiking. *Performance Conditioning for Volleyball*, 2(9), 4–6.
- Vint, P., Dewitt, J., & Marsh, A. (1996). Difference between one-foot and two-foot vertical jump performances. *Journal of Applied Biomechanics*, 12(3), 338–358.
- Vint, P. F. (1998). Hitting biomechanics: the foundation of skill application. *Coaching Volleyball*, April/May, 10–15.
- Vlachopoulos, D., Barker, A. R., Ubago-Guisado, E., Ortega, F. B., Krstrup, P., Metcalf, B., Castro Pinero, J., Ruiz, J. R., Knapp, K. M., Williams, C. A., Moreno, L. A., & Gracia-Marco, L. (2017). The effect of 12-month participation in osteogenic and non-osteogenic sports on bone development in adolescent male athletes. The PRO-BONE study. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 21(4), 404–409. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2017.08.018>
- Voigt, M., & Klausen, K. (1990). Changes in muscle strength and speed of an unloaded movement after various training programmes. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 60(5), 370–376. <https://doi.org/10.1007/BF00713501>
- Voisin, A., Elliott, D. B., & Regan, D. (1997). Babe Ruth: with vision like that, how could he hit

- the ball?. *Optometry and Vision Science*, 74(3), 144–146.
- Wade, M. G. (1980). Coincidence anticipation of young normal and handicapped children. *Journal of Motor Behavior*, 12(2), 103–112. <https://doi.org/10.1080/00222895.1980.10735210>
- Wagner, H., Pfusterschmied, J., Tilp, M., Landlinger, J., von Duvillard, S. P., & Müller, E. (2014). Upper-body kinematics in team-handball throw, tennis serve, and volleyball spike. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 24(2), 345–354. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01503.x>
- Wagner, H., Tilp, M., Von Duvillard, S. P. V., & Mueller, E. (2009). Kinematic analysis of volleyball spike jump. *International Journal of Sports Medicine*, 30(10), 760–765. <https://doi.org/10.1055/s-0029-1224177>
- Wagner, H., Pfusterschmied, J., Tilp, M., Landlinger, J., von Duvillard, S. P., & Müller, E. (2014). Upper-body kinematics in team-handball throw, tennis serve, and volleyball spike. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 24(2), 345–354. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2012.01503.x>
- Wagner, Herbert, Pfusterschmied, J., Klous, M., von Duvillard, S. P., & Müller, E. (2012). Movement variability and skill level of various throwing techniques. *Human Movement Science*, 31(1), 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2011.05.005>
- Waldron, M., Twist, C., Highton, J., Worsfold, P., & Daniels, M. (2011). Movement and physiological match demands of elite rugby league using portable global positioning systems. *Journal of Sports Sciences*, 29(11), 1223–1230. <https://doi.org/10.1080/02640414.2011.587445>
- Wang, Y., Zhao, Y., Chan, R. H. M., & Li, W. J. (2018). Volleyball Skill Assessment Using a Single Wearable Micro Inertial Measurement Unit at Wrist. *IEEE Access*, 6(c), 13758–13765. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2792220>
- Washburn, A., Coey, C. A., & Richardson, M. J. (2013). Intentional constraints on the dynamics of human performance and behavioral variability in motor control. *Proceedings of the Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 3741–3746.
- Watkins, J., & Green, B. N. (1992). Volleyball injuries: a survey of injuries of Scottish National League male players. *British Journal of Sports Medicine*, 26(2), 135–137. <https://doi.org/10.1136/bjism.26.2.135>
- Wedaman, R. A., Tant, C. L., & Wilkerson, J. D. (1988). Segmental coordination and Temporal Structure of the Volleyball Spike. *ISBS - Conference Proceedings Archive*. <https://ojs.ub.uni-konstanz.de/cpa/article/view/2144>
- West, B. J. (1990). Fractal physiology and chaos in medicine. *World Scientific. Singapore*.
- West, T., Ng, L., & Campbell, A. (2014). The effect of ankle bracing on knee kinetics and kinematics during volleyball-specific tasks. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 24(6), 958–963. <https://doi.org/10.1111/sms.12130>
- Whiting, H. T. A. (1969). *Acquiring ball skill. A psychological interpretation*. Lea & Febiger.
- Whiting, H. T. A. (1970). An operational analysis of a continuous ball throwing and catching

- task. *Ergonomics*, 13(4), 445–454. <https://doi.org/10.1080/00140137008931159>
- Whiting, H. T. A., Savelsbergh, G. J. P., & Faber, C. M. (1988). “Catch” questions and incomplete answers. In *Cognition and Action in Skilled Behaviour* (pp. 257–271).
- Whiting, H. T., & Sharp, R. H. (1974). Visual occlusion factors in a discrete ball-catching task. *Journal of Motor Behavior*, 6(1), 11–16. <https://doi.org/10.1080/00222895.1974.10734974>
- Wickstrom, R. (1990). *Patrones motores básicos*. Alianza Deportes.
- Wickstrom, R. L. (1983). *Fundamental motor patterns*. Lea & Febiger.
- Wielki, C., & Dangre, M. (1985). Analysis of jump during the spike of a volleyball. *Biomechanics*, 438–442.
- Wilkerson, J. D. (1985). Comparative model analysis of the vertical jump utilized in the volleyball spike with the standing vertical jump. In *Biomechanics IX-B*. (pp. 434–437). Human Kinetics.
- Williams, A. M., & Davids, K. (1998). Visual search strategy, selective attention, and expertise in soccer. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69(2), 111–128. <https://doi.org/10.1080/02701367.1998.10607677>
- Williams, A. M., Davids, K., & Williams, J. G. (1999). *Visual perception and action in sport*. Taylor and Francis Group.
- Williams, G. K., Irwin, G., Kerwin, D. G., Hamill, J., Van Emmerik, R. E., & Newell, K. M. (2016). Coordination as a function of skill level in the gymnastics longswing. *Journal of Sports Sciences*, 34, 429–439.
- Wilson, C., Simpson, S. E., van Emmerik, R. E. A., & Hamill, J. (2008). Coordination variability and skill development in expert triple jumpers. *Sports Biomechanics*, 7(1), 2–9. <https://doi.org/10.1080/14763140701682983>
- Wisbey, B., Montgomery, P. G., Pyne, D. B., & Rattray, B. (2010). Quantifying movement demands of AFL football using GPS tracking. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(5), 531–536. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2009.09.002>
- Worringham, C. J. (1991). Variability effects on the internal structure of rapid aiming movements. *Journal of Motor Behavior*, 23(1), 75–85. <https://doi.org/10.1080/00222895.1991.9941595>
- Young, W. B., Wilson, G. B., & Birne, C. (1999). A comparison of drop jump training methods: effects on leg extensor strength qualities and jumping performance. *International Journal of Sports Medicine*, 20, 295–303.
- Yu, G., Jang, Y. J., Kim, J., Kim, J. H., Kim, H. Y., Kim, K., & Panday, S. B. (2016). Potential of IMU Sensors in Performance Analysis of Professional Alpine Skiers. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16(4), 463. <https://doi.org/10.3390/s16040463>
- Zahálka, F., Malý, T., Malá, L., Ejem, M., & Zawartka, M. (2017). Kinematic Analysis of Volleyball Attack in the Net Center with Various Types of Take-Off. *Journal of Human Kinetics*, 58(1), 261–271. <https://doi.org/10.1515/hukin-2017-0115>
- Zahradnik, D., Jandacka, D., Uchytíl, J., Farana, R., & Hamill, J. (2014). Lower extremity

mechanics during landing after a volleyball block as a risk factor for anterior cruciate ligament injury. *Physical Therapy in Sport*, 16(1), 53–58.  
<https://doi.org/10.1016/j.ptsp.2014.04.003>

Zhang Huan, L. Y. (1999). Analysis on the General Attack and Serve of the '98 World Men's Volleyball Championship. *Journal of Xi'An Institute of Physical Education*.

Zhang, R. (2000). How to profit by the new rules. *The Coach*, (1), 9–10.

Zhelezniak, Y. D. (1993). *Voleibol. Teoría y método de la preparación*. Paidotribo.

Ziv, G., & Lidor, R. (2010). Vertical jump in female and male volleyball players: A review of observational and experimental studies. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 20(4), 556–567. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0838.2009.01083.x>







