

Repercusiones de la teoría de los sistemas dinámicos en el estudio de la motricidad humana

CARLOTA TORRENTS*

Profesora de Expresión Dinámica.

INEFC- Lleida

NATÀLIA BALAGUÉ**

Profesora de Fisiología.

INEFC Barcelona

Correspondencia con autoras

* carlotat@inefc.es

** nbalague@gencat.net

Resumen

A partir de 1980, la teoría de los sistemas dinámicos empezó a aplicarse al estudio de la motricidad humana, concretamente a la comprensión de la coordinación de movimientos cíclicos, que difícilmente podían ser explicados bajo el marco de la existencia de programas motores. Los resultados de los primeros estudios mostraron cómo el organismo humano es un sistema dinámico complejo que presenta principios de organización similares a cualquier otro sistema dinámico. Posee estados que le atraen, y se producen transiciones de un estado a otro en función de cómo dicho sistema interactúa y se autoorganiza con el entorno. En las transiciones se producirá una pérdida de estabilidad y aparecerán las denominadas fluctuaciones críticas. Estos fenómenos se estudiaron durante la ejecución de todo tipo de tareas cíclicas y posteriormente de tareas acíclicas y de cooperación-oposición entre personas. Estas investigaciones influyeron en las teorías de aprendizaje y control motor y en las ciencias de la actividad física y el deporte.

Palabras clave

Sistema dinámico, Autoorganización, Coordinación.

Abstract

Effects of the Dynamic Systems Theory on the study of human motricity

Since 1980, Dynamic Systems Theory has been applied to the study of human motricity, specially to the understanding of cyclic movements coordination. These kind of movements couldn't be just explained with the theories based on motor programs. Results showed how the human organism is a dynamic complex system that presents typical organizing principles of complex systems. They have attractor states, and transitions between states are produced when interact and self-organize with the environment. During transitions, stability will decrease and critical fluctuations will appear. These phenomena have been studied during the execution of cyclic tasks and also to non-cyclic and cooperation-opposition between persons tasks. These investigations will affect motor control and learning and Sport Sciences.

Key words

Dynamical systems, Self-organisation, Coordination.

Introducción

Durante el siglo xx surgieron diversas teorías que provocaron un cambio sustancial en multitud de ramas de la ciencia. La concepción de los organismos vivos como un todo que interactúa con el entorno y el desarrollo de ecuaciones que pueden describir el comportamiento de los seres vivos han afectado el conocimiento de áreas tan distintas como las matemáticas, la física, la psicología, o la economía. Estas teorías ya no se centrarán en la reducción de los sistemas en componentes más pequeños, sino que los interpretarán de forma integral centrándose en los principios básicos de su organización. Estos principios son a menudo comunes para todo tipo de sistemas, y concretamente en los sistemas

dinámicos complejos, entre los que se encuentran todos los sistemas vivos, se dará el fenómeno de la autoorganización, que los caracterizará con formas de comportamiento semejantes.

Una de las teorías surgidas es la denominada teoría de los sistemas dinámicos (TSD) y, a pesar de que se considera matemática, sus conceptos y técnicas se aplican a un amplio espectro de fenómenos (Abraham y Shaw, 1992; Capra, 1996). La TSD aplicada a los sistemas vivos se puede definir como una teoría del cambio, que pretende capturar, estudiar y entender las transiciones estructurales y de comportamiento que ocurren en dichos sistemas con su entorno y ha sido rápidamente adoptada para describir los mecanismos de progresión y



Figura 1

La figura de la izquierda muestra la posición inicial de la tarea sobre la cual se confeccionó el modelo HKB. La central muestra el movimiento antifase, y la de la derecha el movimiento en fase.

desarrollo humanos, así como para estudiar el fenómeno de la coordinación motriz (Corbetta y Vereijken, 1999; Newell y Molenaar, 1998).

Una de las figuras más representativas de esta línea de investigación ha sido J.A. Scott Kelso, y su obra aparece referenciada en prácticamente todos los estudios posteriores de control motor que aplican la TSD. En 1980, Kugler, Kelso y Turvey iniciaron esta nueva línea (Kugler, Kelso y Turvey, 1980) explicando la fenomenología de los sistemas biológicos en términos de regularidades de los sistemas dinámicos no lineales, y no sólo por la acción del control intencional. Hasta entonces, predominaba la hipótesis de la existencia de programas motores o de generadores centrales de patrones almacenados en el sistema nervioso para explicar la coordinación del movimiento en los seres humanos y en animales. Pero las teorías sobre control motor que se basaban en el concepto del programa motor empezaron a ser criticadas debido a diferentes causas. En primer lugar, no se explican con un lenguaje común a otras ciencias, como la biología o la física, lo que dificulta la búsqueda de relación entre todos los elementos que componen el sistema. En segundo lugar, la naturaleza compleja del ser humano requiere mayor flexibilidad y adaptabilidad que lo que permite un programa motor y éste además requiere el conocimiento previo del resultado pretendido (Beek, Peper y Stegeman, 1995; Schmidt y Fitzpatrick, 1996; Schöner y Kelso, 1988). Por ello Kugler y sus colaboradores se plantearon el estudio de los patrones de coordinación que emergerán en los sistemas biológicos. Bajo este marco teórico se realizaron experimentos sobre la coordinación entre diferentes miembros del ser humano (Kelso, 1984), y

en 1985 se publicó el trabajo experimental de Haken, Kelso y Bunz (1985) con la confección de un modelo teórico no lineal (modelo HKB) que explicaba el comportamiento coordinativo. La tarea utilizada para este fin, ideada por Kelso, consistía en mover rítmicamente los dedos índices de cada mano al ritmo de un metrónomo. Se iniciaba el movimiento de forma paralela, activando los músculos homólogos alternativamente, es decir, con una relación entre los dos miembros denominada antifase. Se pidió a los sujetos que no modificaran el movimiento de forma consciente si notaban que el patrón iba a cambiar, sino que dejaran que los dedos se movieran de la forma más confortable. A cada pulsación del metrónomo, los sujetos debían finalizar un ciclo completo, y la frecuencia se fue incrementando progresivamente. Se observó que a partir de un valor crítico de frecuencia, el movimiento cambiaba espontáneamente y los dedos empezaban a moverse en fase, activándose los músculos homólogos de forma simultánea (véase *fig. 1*). Este cambio de patrón no sucedía cuando se realizaba el experimento en sentido inverso, es decir, empezando con una relación entre los dedos en fase. Así, se mostró una transición involuntaria en la coordinación rítmica de dos miembros, demostrando que existen dos patrones estables (o atractores) a frecuencias bajas y sólo uno a partir de un valor crítico de la frecuencia. El cambio de patrón no será instantáneo, sino que en la zona previa se producirán fluctuaciones en el movimiento, las denominadas fluctuaciones críticas. Previamente a la transición, se puede volver al atractor después de una perturbación externa a pesar de la pérdida de estabilidad, y las fluctuaciones se convertirán en una variable predictora de la proximidad

del punto de transición y de la estabilidad del atractor (Court y cols., 2002).

A partir de este experimento, los resultados de la investigación se extendieron a toda el área del aprendizaje y control motor. Inicialmente se siguió estudiando la organización de los patrones coordinativos cíclicos, ya sea de forma individual o en tareas de colaboración u oposición, pero rápidamente se aplicaron los mismos principios de organización al estudio de movimientos acíclicos y también al aprendizaje de multitud de tareas.

Aplicación de la TSD al estudio de la coordinación de movimientos cíclicos

Kelso continuó experimentando sobre este concepto, y lo quiso ampliar con el estudio de la coordinación entre más de dos miembros, como es el caso de una pierna y un brazo (Kelso y Jeka, 1992). Se observó la misma dinámica, basada en estados estables de coordinación con transiciones espontáneas. Otros autores también lo aplicaron a la coordinación entre diferentes miembros (Baldissera, Cavallari y Civashi, 1982; Fitzpatrick, Schmidt y Lockman, 1996) o entre diferentes partes del mismo miembro (Carson y cols., 1995). También se aplicó a la coordinación entre un brazo y un estímulo visual (Byblow y cols., 1995; Wimmers Beek y Wieringen, 1992) o sonoro (Calvin y Tempardo, 2003).

La tarea propuesta por Kelso de la cual se realizó el modelo HKB, a pesar de su relativa simplicidad, presenta muchas similitudes con los patrones rítmicos de locomoción, que también son estudiados bajo esta perspectiva. El patrón de caminar y de correr es distinto en todos los animales, y uno u otro surgirá en función de múltiples condicionantes y sus relaciones. Son conocidos los experimentos con gatos y caballos que modifican el patrón de locomoción a partir de un valor crítico de velocidad adoptando el más “económico” energéticamente no sin antes haber pasado por una transición caracterizada por la presencia de fluctuaciones críticas del patrón (Kelso, 1999). Se han realizado también estudios con seres humanos, que analizan la influencia de la dinámica del sistema y de la dinámica del medio, y Diedrich y Warren (1995) han observado un incremento de variabilidad en la transición.

Años atrás, el estudio de la locomoción estaba do-

minado por el concepto del programa motor, creado por el sistema nervioso y ejecutado por el sistema músculo-esquelético. La neurociencia se centró en explicar cómo la actividad del sistema nervioso causa el movimiento en el cuerpo, y la biomecánica en cómo la dinámica del sistema músculo-esquelético responde a los estímulos neuronales. ¿Pero cuál era la causa y cuál era el efecto? El movimiento es fruto de la interacción entre el sistema músculo-esquelético, el sistema nervioso y el entorno, y los estados de atracción surgirán de la interacción de todo el sistema.

La principal repercusión del estudio de este tipo de fenómenos desde esta perspectiva es seguramente que los investigadores empiezan a interesarse por cómo se organiza el organismo en movimiento y por la búsqueda de principios comunes de organización para todo tipo de sistemas. Se descarta el concepto de programa motor para explicar la ejecución de movimientos cíclicos y se plantea la aparición de fluctuaciones en las zonas de transición como una posible señal de la no linealidad del sistema, así como una muestra de que los comúnmente denominados errores de ejecución pueden ser necesarios e imprescindibles para producir un cambio en el comportamiento del sistema.

De forma paralela a los estudios sobre coordinación entre miembros de una misma persona, aparecen muchas investigaciones en las que se analiza la coordinación entre miembros de personas distintas. Consideramos este tipo de tareas de gran importancia a la hora de explicar las aplicaciones de la TSD, puesto que representan un ejemplo de tareas en las que no hay una estructura cognitiva común que pueda producir la coordinación motriz. El hecho de que aparezcan fenómenos similares a los vistos durante el movimiento de una persona, como las transiciones entre fases o las fluctuaciones críticas, pone si cabe más de manifiesto que estos fenómenos no son fruto de la existencia de un programa motor. Al igual que en los sistemas físicos, no puede haber un programa común entre dos personas. Un ejemplo de acoplamiento entre dos sistemas físicos es el de dos relojes de pared colocados próximos uno del otro y con sus péndulos oscilando en fases distintas. La vibración de la pared provocará una interacción entre ambos relojes hasta que oscilen en modo en fase o antifase, llegando así a un estado de equilibrio o atractor. Estudios con personas muestran un comportamiento similar cuando se pide a los sujetos que hagan oscilar un miembro o un péndulo a la vez que otra persona mientras puedan verse mutuamente. Schmidt, Carello y

Turvey (1990) demostraron una transición de un estado de coordinación antifase a uno en fase en una tarea en la que los sujetos debían mover su pierna u oscilar un péndulo con la muñeca coordinadamente y en modo antifase con la del compañero y a una frecuencia determinada por un metrónomo. El aumento de la frecuencia de forma progresiva provocó el mismo efecto que el famoso estudio de Kelso, la imposibilidad de mantener la coordinación antifase y la transición a una coordinación en fase, pero no viceversa, así como la aparición de fluctuaciones críticas.

El estudio de la interacción entre personas tiene claras aplicaciones en la investigación deportiva. Todos los deportes en los que se realizan movimientos con música y en grupo pueden ser objeto de este tipo de estudios, como es el caso de la gimnasia rítmica o aeróbica o la natación sincronizada. Estos deportes estarán constituidos por tareas en las que el objetivo es la coordinación interpersonal en sí misma, además de acoplarse a una frecuencia externa marcada por el ritmo de la música. No obstante, la mayoría de deportes de equipo estarán constituidos por tareas en las que la coordinación entre los jugadores no será el objetivo, como sucedía en la tarea de la oscilación del péndulo a la frecuencia más confortable. El estudio de la interacción entre los sujetos puede explicar comportamientos que se dan en el juego, tanto en tareas de cooperación como de oposición. En esta línea, McGarry y cols. (2002) estudiaron diversos deportes de cooperación-oposición, como el squash o el fútbol, para demostrar que éstos pueden analizarse concibiéndolos como sistemas dinámicos complejos, ya que presentan el comportamiento dinámico característico de éstos.

Aplicaciones de la TSD al estudio de movimientos acíclicos

Los estudios que se han citado anteriormente se centraban eminentemente en tareas cíclicas. Probablemente esto sea consecuencia de la mayor dificultad que presentan las tareas no cíclicas para identificar los estados de atracción debido a la corta duración de las mismas y a las variables que caracterizan el estado del sistema. No obstante, Schöner estudió una tarea acíclica desde esta perspectiva ya en 1990 (Schöner, 1990), y se han seguido estudiando y observado señales de no linealidad en este tipo de tareas, como durante la ejecución de saltos verticales (Torrents, 2005).

En todos los movimientos acíclicos la intención será un factor influyente, puesto que el movimiento debe iniciarse en un momento concreto. La intención se tratará como una información del comportamiento, y la dinámica intrínseca vendrá determinada por la postura inicial y por el objetivo del movimiento. Desde esta perspectiva se han estudiado diferentes tareas, especialmente de intercepción de objetos o de acoplamiento de la percepción con la acción (McLeod y Dienes, 1993; Peper y cols., 1994; McBeath Shaffer y Kaiser, 1995; Montagne y cols., 2000). También se han estudiado algunas tareas deportivas, como la carrera previa al salto de longitud (Buekers, Montagne y Laurent, 1999), caracterizada por una reducción de la variabilidad de la distancia media de cada paso, o el saque de voleibol. Davids y cols. (1999) lo utilizaron como tarea que requiere un alto grado de coordinación entre muchas partes relevantes del sistema de movimiento y necesita que la acción se coordine espacio-temporalmente con la información de los condicionantes impuestos por la pelota. Analizaron el desplazamiento y las series temporales de la coordinación entre los miembros durante el saque en jugadores expertos. Observaron una fuerte relación en fase entre los pares de articulaciones adyacentes (cadera-hombro, hombro-codo y codo-muñeca), mostrando estructuras organizadas sinérgicamente moviéndose en la misma dirección en el mismo momento de la transición y con perfiles de velocidad similares. Temprado (2000) comparó este patrón con el que tienen aprendices noveles y observó que, con relación a la posición de la pelota, los mejores sacadores mantenían una consistencia espacial y temporal en la colocación vertical de la pelota. El análisis de la relación entre la información de la pelota en el punto más alto y el inicio del movimiento de la cadera hacia delante revelaron que estaban muy acoplados y eran muy poco variables. La acción del inicio del golpeo y la bola en el punto más alto constituirá un estado atractor, un “sistema de saque”, y la práctica de las diferentes fases sin dividir las permitiría al aprendiz explorar las relaciones emergentes entre los condicionantes físicos e informacionales de la tarea y encontrar relaciones individuales. Si se practica de forma descompuesta, como suele hacerse en muchos ejercicios enfocados a la optimización de la técnica deportiva, el aprendiz explorará la región incorrecta del espacio.

En resumen, el estudio de las tareas acíclicas mostró que los principios surgidos de la TSD pueden aplicarse a un gran abanico de tareas. Entre estos principios se destaca la autoorganización del sistema con su entorno,

es decir, la organización sinérgica de todo el organismo condicionado por todos los elementos del entorno con el que interactúa. A partir de estas conclusiones, se ha propuesto variar las condiciones del entorno durante el aprendizaje para favorecer la autoorganización del sistema en la dirección del aprendizaje. Un ejemplo de esta variación podría ser la utilización de marcas en el suelo que resaltarán puntos importantes de la tarea. Los inexpertos serán incapaces de detectar la información relevante y útil del medio, y tendrán problemas para producir el patrón de movimiento. Con las marcas, en cambio, los aprendices serán más susceptibles a la información que les proporciona el entorno (Buekers y cols., 1999).

El aprendizaje de acciones motrices desde la perspectiva de la TSD

En el modelo HKB se pedía a los sujetos participantes que no intervinieran voluntariamente en el cambio de patrón motor, evitando por tanto la participación de la intención, condicionante imprescindible en los procesos de aprendizaje. De hecho, ésta será la principal característica que distinguirá a la coordinación biológica de la de los sistemas inanimados, la presencia de la intención, de la consecución de un objetivo. Scholz y Kelso (1990) demostraron que la manipulación de la intención podía modificar la dinámica de la coordinación, e incluso evitar una transición bajo determinadas condiciones. Zanone y Kelso (1992) estudiaron a diferentes sujetos que debían practicar el movimiento oscilatorio de los dedos con una relación fase de 90° , y, después de cinco días de práctica, este patrón coordinativo presentó las características de un atractor. Se había modificado así la distribución de los atractores. Se ve de esta forma un cambio en el concepto tradicional del aprendizaje, que pasará a ser una modificación específica de algo que ya existe en los modelos de comportamiento en la dirección de la tarea a aprender. Toda la distribución de los atractores se modifica y se reconstruye (se pasa de un estado organizado de un sistema a otro) y la dificultad del proceso variará en función de si la tarea a aprender coopera o compete con los estados que atraían al sistema previamente.

También se analizaron las fluctuaciones que se producen durante el aprendizaje. Schmidt y cols. (1992) estudiaron el aprendizaje de la oscilación de dos péndulos

(uno en cada mano) con una frecuencia de 2:1 durante 12 sesiones, y encontraron una reducción de las fluctuaciones y de la desviación de la frecuencia escogida a lo largo del periodo de práctica. Teniendo en cuenta estos resultados, podemos suponer que la medida de las fluctuaciones puede ser una medida de la estabilidad de un aprendizaje o de la dificultad que presenta la tarea para el sujeto.

Se ha valorado también en este tipo de experimentos la contribución que tiene en el aprendizaje los condicionantes propios del sistema (correspondientes al sistema neuromuscular-esquelético) y los propios de la tarea o del entorno, observando que ambos condicionantes influyen en el aprendizaje (Carson y cols., 1996).

Walter y Swinnen (1992) estudiaron el aprendizaje de una tarea coordinativa asimétrica realizando la estrategia inversa a la propuesta por la tarea del modelo HKB. En dicha tarea, el aumento de la frecuencia producía una transición del movimiento en modo antifase al modo en fase, de lo que se deduce que bajar la frecuencia facilitará el aprendizaje de la transición inversa. Walter y Swinnen observaron como a medida que se va progresando, se puede aumentar la frecuencia de los movimientos y aprender así tareas que en un principio no atraen al sistema. El parámetro no tiene por qué ser la frecuencia, pero es ésta una estrategia muy utilizada para aprender movimientos deportivos. Se realiza primero a menor velocidad y se va incrementando a medida que progresa el aprendizaje.

Esta concepción del aprendizaje y del control motor representa una clara evolución con relación a la perspectiva del programa motor, y llevó a diferenciar claramente los conceptos de estabilidad y variabilidad. La experimentación surgida a raíz de la perspectiva dinámica muestra la estabilidad de los patrones coordinativos a la vez que su flexibilidad en función de los componentes que actúan y sus propiedades biomecánicas. Los patrones coordinativos serán estables pero variables a su vez (Kelso, 1997). La perspectiva dinámica enriquece la anterior al incluir propiedades que no pueden explicarse con la teoría de la programación motriz, como son la presencia de fluctuaciones, que predicen el cambio entre estados de coordinación, o las bifurcaciones o el aprendizaje “a saltos”. También esta perspectiva nos ayuda a comprender el aprendizaje de cualquier habilidad, en cualquier etapa del aprendizaje o de la evolución del ser humano, integrando el entorno en el proceso, la individualidad de las relaciones que se dan entre el aprendiz y el entorno, y la influencia de las condiciones iniciales,

es decir, las habilidades y competencias que ya dispone el sujeto en el momento de someterse al aprendizaje (Riera, 2005).

Conclusiones

Los conceptos que surgen de la TSD pueden aplicarse al estudio del ser humano en movimiento. El organismo es un sistema dinámico complejo que se autoorganiza para moverse, y presenta las propiedades de todo sistema de estas características. Posee estados que le atraen y se producen transiciones de un estado a otro en función de cómo se interactúa con el medio. En las transiciones se produce una pérdida de estabilidad y aparecen fluctuaciones críticas que anticipan el cambio. Estos principios se han mostrado durante la ejecución de tareas de todo tipo, y su aprendizaje estará condicionado por la presencia de dichos atractores y por la necesaria desestabilización de éstos para poder aprender y crear de nuevos. La nueva teoría supone un cambio en la comprensión de los mecanismos relacionados con el movimiento humano, y cuestiona definitivamente la validez del extendido concepto del programa motor. A su vez, supone un reto a la hora de optimizar los procesos de adaptación y aprendizaje.

Agradecimientos

Las autoras agradecen la colaboración en la revisión de este artículo del Dr. Joan Riera.

Bibliografía

- Abraham, R. H. y Shaw, C. S. (1992). *Dynamics- The geometry of behaviour*. California: Adison-wesley publishing company.
- Baldissera, F.; Cavallari, P. y Civashi, P. (1982). Preferential coupling between voluntary movements of ipsilateral limbs. *Neuroscience Letters*, 34, 95-100.
- Beek, P. J.; Peper, C. E. y Stegeman, D. F. (1995). Dynamical models of movement coordination. *Human Movement Science*, 14, 573-608.
- Byblow, W. D.; Chua, R.; Bysouth-Young, D. F. y Summers, J. J. (1999). Stabilisation of bimanual coordination through visual coupling. *Human Movement Science*, 18, 281-305.
- Buekers, M. J.; Montagne, G. y Laurent, M. (1999). Is the player in control, or is the control somewhere out of the player? *International Journal of Sport Psychology*, 30, 490-506.
- Calvin, S. y Temprado, J. J. (2003). Coalition of informational and neuromuscular constraints in a synchronization task. Schöllhorn, W. I., Bohn, C., Jäger, J. M., Schaper, H., & Alichmann, M.. *European Workshop on Movement Science. Mechanics, Physiology, Psychology*. Köln: Sport Buch Strauss.
- Capra, F. (1996). *La trama de la vida*. Barcelona: Anagrama.
- Carson, R. G.; Goodman, D.; Kelso, J. A. S. y Elliot, D. (1995). Phase transitions and critical fluctuations in rhythmic coordination of ipsilateral hand and foot. *Journal of Motor Behavior*, 27, 211-224.
- Carson, R. G.; Byblow, W. D.; Abernethy, B. y Summers, J. J. (1996). The contribution of inherent and incidental constraints to intentional switching between patterns of bimanual coordination. *Human Movement Science*, 15, 565-589.
- Corbetta, D. y Verijken, B. (1999). Understanding development and learning of motor coordination in sport: the contribution of dynamic systems theory. *International Journal of Sport Psychology*, 30, 507-530.
- Court, M. L. J.; Bennett, S. J.; Williams, A. M. y Davids, K. (2002). Local stability in coordinated rhythmic movements: fluctuations and relaxation times. *Human Movement Science*, 21, 39-60.
- Davids, K.; Bennett, S.; Handford, C. y Jones, B. (1999). Acquiring coordination in self-paced, extrinsic timing tasks: a constraints-led perspective. *International Journal of Sport Psychology*, 30, 437-461.
- Diedrich, F. J. y Warren, W. H. (1995). Why change gaits? Dynamics of the walk-run transition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(1), 183-202.
- Fitzpatrick, P.; Schmidt, R. C. y Lockman, J. J. (1996). Dynamical patterns in the development of clapping. *Child Development*, 67(6), 2691-2708.
- Haken, H.; Kelso, J. A. S. y Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, 51, 347-356.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Reg. Integ. Comp.* 15, R1000-R1004.
- (1997). Relative timing in brain and behavior: some observations about the generalized motor program and self-organized coordination dynamics. *Human Movement Science*, 16, 453-460.
- (1999). *Dynamic Patterns*. USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Kelso, J. A. S. y Jeka, J. J. (1992). Symmetry breaking dynamics of human interlimb coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(3), 645-668.
- Kugler, P. N.; Kelso, J. A. S. y Turvey, M. T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. G. E. Stelmach, & J. Requin *Tutorials in Motor Behavior*. Amsterdam.
- McBeath, M. K.; Shaffer, D. M., y Kaiser, M. K. (1995). How baseball outfielders determine where to run to catch fly balls. *Science*, 268, 569-573.
- McGarry, T.; Anderson, D. I.; Wallace, A.; Hughes, M. D. y Franks, I. M. (2002). Sport competition as a dynamical self-organizing system. *Journal of Sports Sciences*, 20, 771-781.

- McLeod, P. y Dienes, Z. (1993). Running to catch the ball. *Nature*, 362, 23.
- Montagne, G.; Fraitse, F.; Ripoll, H. y Laurent, M. (2000). Perception-action coupling in an interceptive task: First-order time-to-contact as an input variable. *Human Movement Science*, 19, 59-72.
- Newell, K. M. y Molenaar, P. C. (1998). *Applications of nonlinear dynamics to developmental process modeling*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates.
- Peper, L.; Bootsma, R. J.; Mestre, D. R. y Bakker, F. C. (1994). Catching balls: how to get the hand to the right place at the right time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20(3), 591-612.
- Riera, J. (2005). *Habilidades en el deporte*. Barcelona: Inde publicaciones.
- Schmidt, R. C.; Carello, C. y Turvey, M. T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(2), 227-247.
- Schmidt, R. C. y Fitzpatrick, P. (1996). Dynamical perspective on motor learning. H. N. Zelaznik *Advances in motor learning and control*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. C.; Treffner, P. J.; Shaw, B. K. y Turvey, M. T. (1992). Dynamical aspects of learning an interlimb rhythmic movement pattern. *Journal of Motor Behavior*, 24(1), 67-83.
- Scholz, J. P. y Kelso, J. A. S. (1990). Intentional switching between patterns of bimanual coordination depends on the intrinsic dynamics of the patterns. *Journal of Motor Behavior*, 22, 98-124.
- Schöner, G. (1990). A dynamic theory of coordination of discrete movement. *Biological Cybernetics*, 63, 257-270.
- Schöner, G. y Kelso, J. A. S. (1988). Dynamic patterns generation in behavioral neural systems. *Science*, 239, 1513-1519.
- Temprado, J. J. (2000). Inter-joint coordination subserving the volley-ball serve: a dynamical approach to expertise. *Congres International de la SFPS- Paris INSEP 2000- Symposia*.
- Torrents, C. (2005). *La teoría de los sistemas dinámicos y el entrenamiento deportivo*. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.
- Wimmers, R. H.; Beek, P. J. y van Wieringen, P. C. W. (1992). Phase transitions in rhythmic tracking movements: A case of unilateral coupling. *Human Movement Science*, 11, 217-226.
- Walter, C. B. y Swinnen, S. P. (1992). Adaptive tuning of interlimb attraction to facilitate bimanual decoupling. *Journal of Motor Behavior*, 24(1), 95-104.
- Zanone, P. G. y Kelso, J. A. S. s. (1992). Evolution of behavioural attractors with learning: nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(2), 403-421.