

Universitat de Lleida

TESI DOCTORAL

**Entrenamiento deportivo y complejidad:
actualizando supuestos teóricos, prácticos e hipótesis
de investigación**

Rafel Pol Cabanellas

Memòria presentada per optar al grau de Doctor per la Universitat de Lleida
Programa de Doctorat en Activitat Física i Esport

Director/a
Natàlia Balagué Serre
Robert Hristovski

Tutor/a
Carlota Torrents Martin

2021

“En todas las actividades es saludable, de vez en cuando, poner un signo de interrogación sobre aquellas cosas que por mucho tiempo se han dado por seguras”

Bertrand Russell

Agradecimientos

Probablemente no haya ni una sola persona en este mundo que sea capaz de hacer una galleta. Como mínimo, es difícil imaginar que alguien sea capaz cultivar cereales, producir el azúcar, el cacao y todos los ingredientes necesarios mientras, a su vez, es capaz de fabricar los utensilios necesarios para ello: herramientas para trabajar la tierra y moler el cereal, un horno en el que hornear las galletas, etc. Si para algo aparentemente tan sencillo como hacer una galleta es razonable pensar que nadie en la especie humana es capaz de completar el proceso de manera autónoma, es obvio que cuando condecoran a uno con el título de doctor en realidad se está personificando en una sola persona el mérito de muchas otras.

Al igual que el que disfruta de una galleta no es capaz de poner cara a quienes fabricaron las diferentes piezas del horno en el que se ha elaborado su deliciosa galleta, con toda probabilidad me olvidaré de personas que han resultado indispensables en este proceso. Sin embargo, me gustaría destacar algunas de las más importantes en este camino. En primer lugar, y sin ningún tipo de duda, me gustaría mencionar a Natàlia. No solo porqué sin ella no habría empezado el doctorado, sino porqué tengo profundas dudas de si habría siquiera acabado la carrera de no haberme cruzado con ella. En segundo lugar a Carlota, quien sin darse cuenta me iluminó desde el día que cayó en mis manos su tesis doctoral y quien no ha dejado de inspirarme siempre que la leo o escucho. Además, y como no podía ser de otra manera, me gustaría agradecer la inestimable colaboración en la elaboración de los diferentes artículos de Robert Hristovski, Àngel Ric, Isaac Guerrero, Daniel Medina y John Kiely. Por otra parte, me gustaría agradecer también a Myriam Guerra por su acogida física y conceptual. Querría también mencionar la paciente ayuda y colaboración del personal de la Universidad de Lleida en los no pocos trámites y gestiones que requiere el doctorado. Ojalá algunas de las cosas buenas que podamos sacar de esta pandemia sea la agilización de los trámites burocráticos.

Y por último, pero no menos importante, me gustaría resaltar el papel de Raquel, así como el de mi familia, por su apoyo incondicional, sin el que habría resultado imposible superar todas las dificultades intrínsecas al proceso.

Resumen	5
Resum	6
Abstract.....	7
1.0 Introducción	8
1.1 Introducción personal al doctorado y la tesis	8
1.2 Justificación de los objetivos de la tesis.....	11
1.3 Estructura de la memoria	15
2.0 De dónde venimos y hacia dónde proponemos ir en entrenamiento deportivo	20
2.1 Origen y evolución de los supuestos tácitos en ciencias del deporte	20
2.1.1 Cómo una bola de nieve en forma de extrapolación equivocada se convierte en una auténtica avalancha	
2.1.3 Descifrando el enigma: mismas evidencias, diferentes interpretaciones	
2.1.4 Necesitamos cambiar el statu quo en las ciencias del deporte	
2.2 La perspectiva de los sistemas complejos y la teoría de los constreñimientos como base para un nuevo marco teórico y metodológico en entrenamiento deportivo.....	36
2.3 Consecuencias en el entrenamiento deportivo y la prevención de lesiones	40
3.0 Artículos publicados	49
3.1 ¿Ciencia o pseudociencia de la actividad física y el deporte?	49
3.2 On the relatedness and nestedness of constraints.....	58
3.3 Training or synergizing? Complex systems principles change the understanding of sports processes	69
3.4 From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review	83
4.0 Discusión	92
4.1 Limitaciones y perspectivas de futuro	100
5.0 Conclusiones	103
6.0 Referencias.....	106

Resumen

La ciencia del deporte evoluciona pero sigue anclada en supuestos tácitos, creencias infundadas y teorías poco actualizadas o de cuestionable validez. Con un planteamiento eminentemente deductivo, y en base a las ciencias de la complejidad, esta tesis se propone ofrecer nuevos supuestos teóricos, prácticos, e hipótesis de investigación aplicadas al entrenamiento deportivo. En primer lugar, se sugieren una serie de intervenciones orientadas a la formación de entrenadoras y entrenadores, así como al desarrollo de sus competencias para actuar en entornos complejos. En segundo lugar, se ofrece una comprensión del deportista / equipo, de sus propiedades relacionadas con el rendimiento, y de los procesos de entrenamiento y lesión desde la perspectiva de los sistemas dinámicos complejos. Se proponen por primera vez a) una sistematización de los principios teóricos y metodológicos orientados al entrenamiento desde la complejidad, b) una redefinición de los constreñimientos de la tarea y de su clasificación, c) incorporar la propiedad de anidamiento temporal y causalidad circular de los constreñimientos para mejorar la comprensión y eficacia del proceso de entrenamiento, d) explicar los mecanismos de lesión deportiva en base a la teoría de percolación, y e) las medidas de conectividad como variables de estudio en la prevención de lesiones.

Resum

La ciència de l'esport evoluciona però segueix ancorada en supòsits tàcits, creences infundades i teories poc actualitzades o de qüestionable validesa. Amb un plantejament eminentment deductiu, i d'acord amb les ciències de la complexitat, aquesta tesi es proposa transformar aquests supòsits teòrics i pràctics, i oferir noves hipòtesis d'investigació aplicades a l'entrenament esportiu. En primer lloc, es suggereixen una sèrie d'intervencions orientades a la formació d'entrenadores i entrenadors, així com al desenvolupament de les seves competències per actuar en entorns complexos. En segon lloc, s'ofereix una nova comprensió de l'esportista / equip, de les seves propietats relacionades amb el rendiment esportiu, i dels processos d'entrenament i lesió des de la perspectiva dels sistemes dinàmics complexos. Es proposa per primera vegada: a) una sistematització dels principis teòrics i metodològics de l'entrenament des de la complexitat, b) una redefinició dels constreyniments de la tasca i de la seva classificació, c) la propietat de nidificació temporal i causalitat circular dels constreyniments per millorar la comprensió i eficàcia del procés d'entrenament i trencar amb el seu reduccionisme, d) explicar els mecanismes de lesió esportiva en base a la teoria de percolació i e) les mesures de connectivitat com a variables d'estudi en la prevenció de lesions.

Abstract

Sport science evolves but prejudices and tacit assumptions in the field favour the presence of pseudo-science in education and professional practice. With an eminently deductive approach, and based on the complexity science, this thesis aims to transform these assumptions offering new theoretical, practical principles and new research hypotheses applied to sports training. First, we suggest a series of interventions aimed at training coaches and trainers and developing their skills to act in complex environments. Second, an understanding of the athlete / team, its performance - related properties, and training and injury processes is offered from the perspective of complex dynamic systems. For the first time is proposed, a) a systematization of theoretical and methodological principles oriented to training from complexity science, b) a redefinition of task constraints and its classification c) to incorporate the property of temporal nesting and circular causality of the constraints to improve the understanding and effectiveness of the training process, d) to explain the mechanisms of sports injury based on the percolation theory, and e) to use connectivity measures as study variables in injury prevention.

1.0 Introducción

1.1 Introducción personal al doctorado y la tesis

“Es difícil conseguir que una persona entienda algo cuando su salario depende de que no lo entienda”

Upton Sinclair

Toda obra es el producto que emerge de la interacción entre la historia personal de su autor y sus circunstancias actuales, que constriñen su visión del *statu quo*. A lo largo de la memoria voy desgranando cuales han sido las circunstancias que, en cada momento del proceso de doctorado, me han ido empujando hacia determinados caminos que han acabado conformando los trabajos que aquí se presentan. No obstante, antes de profundizar con el contenido final de la tesis, me gustaría hacer una breve mención acerca del espíritu desde el que está elaborada así como de algunos eventos vitales que claramente constriñen mi visión y análisis de las teorías vigentes.

Durante el verano de 2007, en mis vacaciones entre el primer y segundo curso universitario, decidí ampliar los conocimientos adquiridos en ese primer año. Uno de los documentos que estudié y analicé con mayor ahínco fue la tesis de la Dr. Carlota Torrents. *La teoría de los sistemas dinámicos y el entrenamiento deportivo* no era un título especialmente atractivo para mí en aquel momento, pero el instinto me empujó a leerla. Y ese momento cambió mi trayectoria académica y profesional. A partir ese evento comencé a investigar, profundizar y escribir sobre cómo podría aplicar todos esos conceptos al fútbol. Casi sin darme cuenta, un día esos escritos tuvieron forma de libro. Hace 10 años ya que publiqué *La preparación ¿Física? en el fútbol*. Sin embargo, no ha pasado un solo día en el que no haya intentado cuestionar lo que ahí escribí. De hecho, sin rubor alguno, cuando alguien me comenta que lo está leyendo o lo quiere leer, le aviso de que muchas de las cosas que están ahí escritas, desde mi posición actual, las cambiaría por completo. Por desgracia, me he ido dando cuenta de que aceptar la necesidad de evolución de la obra propia, de las ideas con las que uno se había alineado anteriormente, e incluso del *statu quo* general es algo poco común. Los científicos (y por extensión la ciencia) avanzan, salvo contadísimas excepciones, asentados sobre una estructura de ideas y supuestos tácitos aceptados en cada época. Ciertamente esto

ofrece estabilidad a los científicos y les facilita avanzar en sus investigaciones. Pero, es innegable a su vez que estas asunciones constriñen el potencial de diversidad de las ideas científicas, limitando por tanto su potencial de adaptación a nuevos contextos, especialmente cuando se vuelven demasiado estables. La física (una de las disciplinas científicas más prestigiosa y estudiada desde el punto de vista histórico), está llena de ejemplos en los que la estructura tácita de ideas o *statu quo* impedía o dificultaba enormemente su avance, pues éste no requería encontrar nuevas respuestas a las preguntas que durante décadas o siglos se venían haciendo los físicos, sino cambiar las premisas iniciales y generar nuevas preguntas. Por ejemplo, la idea de cómo la tierra podía tirar de la manzana haciendo que caiera del manzano a la cabeza de Newton intrigaba enormemente a Einstein, quien no era capaz de comprender cómo podía producirse ese efecto a distancia. Si se hubiese ceñido a la visión newtoniana que suponía que el tiempo y el espacio eran absolutos, jamás habría sido capaz de formular la teoría de la relatividad, según la cual la masa de la tierra deforma el tejido espacio-temporal atrayendo la manzana en esa dirección.

En mi caso, desde ese afortunado verano del 2007 he buscado de manera casi obsesiva la justificación científica de todo aquello relativo a mi actividad profesional, siempre con el honesto afán de comprender mejor aquello que hacía. En esa búsqueda incesante de evidencia científica, retroalimentada en todo momento por la experiencia práctica que he tenido con jugadoras y jugadores de todos los niveles (desde niños de dos años a mi labor durante la última década con algunos de los considerados mejores equipos y futbolistas del mundo), he ido tomando consciencia de la infinidad de supuestos sobre los que me basaba y que, para mi asombro, carecían de suficiente fundamento o justificación. A su vez, este proceso me ha permitido ir conociendo cada vez mejor las potencialidades y limitaciones de los métodos que la comunidad científica usa para generar conocimiento.

Gracias a ello he podido observar, con sorpresa y resignación, la defensa, en ocasiones irracional, del *statu quo* imperante en las ciencias del deporte. Mi divulgación de esta visión constructivamente crítica de nuestra profesión ha sido intensamente criticada y descalificada por antiguos profesores, así como por colegas de las ciencias del deporte en general y del fútbol en particular. Entiendo que no es algo personal, que en realidad no me atacan a mí, sino que se defienden a ellos mismos. Quizás, uno de los clichés más repetidos tras la publicación del libro, que desde el título mismo cuestionaba algunas de

las bases más fundamentales de la profesión, es que esta nueva visión supone una amenaza para la misma. Ahora, más de una década después, y tras los largos procesos de debate con revisores y editores de las revistas en las que han sido publicados los trabajos de la tesis, tengo la sensación de volver al punto de partida. De nuevo, el hecho de cuestionar algunos de los pilares más asentados en nuestra profesión se ha visto envuelto de presagios catastrofistas para la misma.

Estoy convencido de que defender el *statu quo* ante las evidencias de su precariedad no es defender la profesión, sino defenderse a uno mismo de los avances inevitables del conocimiento científico y, por ende, de los progresos en la profesión. La motivación última en la realización de esta tesis, por encima de obtener el título de doctor, es la de hacer evidente las contradicciones que dominan el ámbito científico y profesional en ciencias del deporte. Para ello es imprescindible cuestionar y desarmar los argumentos más básicos tras los que se amparan algunas de las premisas más arraigadas en el entrenamiento deportivo. No para acabar con la profesión, sino para aumentar su utilidad asegurando así su continuidad.

De hecho, si tuviera que sintetizar mis últimos 10 años de trabajo en un solo aforismo que pudiera entregar a mi yo de hace una década, sin duda alguna sería "*intenta con todas tus fuerzas probar que tus mayores convicciones son falsas*". El conocimiento crece por sustracción mucho más que por adición, dado que lo que hoy creemos puede demostrarse erróneo en un futuro, pero lo que sabemos que ya es erróneo no podrá demostrarse correcto más adelante (o, cuando menos, no tan fácilmente) (Popper, 1934; Taleb, 2013). Sin embargo, dicha sustracción es dolorosa. Cuesta mucho abandonar la complacencia que surge cuando somos engañados por una falsa sensación de seguridad, por la comodidad persuasiva de lo convencional y por la atractiva, aunque ilusoria, legitimidad científica de las teorías clásicas del entrenamiento (Kiely, 2018). Por ello, ruego al lector un esfuerzo en favor de una conciencia escéptica como base esencial para la interpretación de los trabajos expuestos en la tesis. Una actitud que permita cuestionar las bases más sólidas de aquello a lo que hemos dedicado años, obviando el apego emocional que se acaba generando con nuestra propia colección de ideas y supuestos tácitos.

1.2 Justificación de los objetivos de la tesis

“Cambiar de respuesta es evolución. Cambiar de pregunta es revolución”

Jorge Wagensberg

En 1922, Archibald Vivian Hill y Otto Fritz Meyerhof compartieron el premio Nobel de medicina por sus trabajos en los que concluían que la incapacidad de aportar oxígeno suficiente al músculo para eliminar el ácido láctico que producía la actividad muscular era la causa de la fatiga muscular (Hill y Lupton, 1923). Décadas más tarde ocurriría un evento fundamental en la evolución histórica de este modelo. Taylor y col. (1955) identificaron una "meseta" en el consumo de oxígeno en la mayoría de los humanos (94%) durante pruebas de esfuerzo. El umbral descrito se convirtió en el marcador virtual de un hipotético evento intracelular, el desarrollo de anaerobiosis en el músculo esquelético (pilar central del modelo de Hill). Esto otorgó una aceptación científica universal al modelo que establece una relación directa y determinista entre la capacidad para aportar oxígeno al músculo y la de mantener un esfuerzo. Desde entonces se ha establecido una de las más prolíficas líneas de investigación a la que han contribuido intensamente algunos de los científicos más influyentes en la historia de las ciencias del deporte (Noakes y St. Clair Gibson, 2004).

Sin embargo, hoy sabemos que ningún evento particular, intra o extracelular, determina la claudicación en un ejercicio de resistencia (Balagué y col., 2014; Enoka y Duchateau, 2008; Gandevia, 2001; Lambert, St Clair Gibson y Noakes, 2005) y que el modelo de los umbrales presenta limitaciones incuestionables (Noakes y Clair Gibson, 2004). De hecho, aunque exista cierto debate sobre el modelo definitivo de la fatiga inducida por el ejercicio, existe un claro consenso entre autores: sus mecanismos involucran al organismo en su conjunto y son dependientes de la tarea que se está realizando (Balagué y col., 2014; Enoka y Duchateau, 2008; Gandevia, 2001; Lambert, St Clair Gibson y Noakes, 2005). No obstante, el modelo de los umbrales se ha mostrado resiliente a todas las contingencias con las que ha tenido que lidiar a lo largo de las últimas décadas y sigue, sorprendentemente, siendo tendencia. Una de las muestras más simples e inequívoca de sus limitaciones se relaciona con el pilar más básico sobre el que se sustenta el modelo, como es la detección de los umbrales apuntada por Taylor y colaboradores en 1955, la cual no ha superado las pruebas de reproducibilidad a las que

ha sido sometido. Noakes y St Clair Gibson (2004) examinaron 33 estudios en los que se analizó a 1978 sujetos, en los que se pretendía identificar dichos umbrales y observaron que, no solo en la mayoría de los sujetos jamás aparecieron dichos umbrales, sino que además, en los que sí fueron capaces de identificar algún tipo de umbral, éste no se correspondía con las características estimadas por Hill (Hill y Lupton, 1923) ni descritas por Taylor y col. (1955).

Estas dificultades en la replicación de resultados suponen una auténtica epidemia y son comunes en diferentes ámbitos de la ciencia. Como ejemplo, no solo el 70% de los científicos encuestados por la prestigiosa revista Nature reconoce haber fracasado en su intento de reproducir los resultados de otros investigadores, sino que varios de los encuestados que habían publicado una réplica fallida dijeron que los editores y revisores exigieron que minimizaran las comparaciones con el estudio original (Baker, 2016), simbolizando perfectamente la prevalencia del *statu quo* sobre la crítica constructiva y la evolución científica. Esta defensa de lo tradicional permite que la comunidad científica, a pesar de las evidencias, siga dando validez al modelo de los umbrales. Como muestra, si realizamos la búsqueda “aerobic training” en PubMed obtenemos 6579 publicaciones durante los últimos 5 años (2015-2020). Si la búsqueda mantiene el criterio temporal y se refiere a “anaerobic training” arroja 2046 resultados. El total nos deja una media de casi 5 publicaciones diarias durante los últimos 5 años.

¿Cómo puede ser que sigamos utilizando un modelo con tan probadas limitaciones? ¿Es esta una excepción? ¿O simplemente un reflejo más del sesgado proceso de evolución en ciencias del deporte? En 1988, Samuelson y Zeckhauser mostraron como los humanos, en diferentes ámbitos (entre los que incluían la ciencia y los científicos) cuando tienen que escoger sobre sus preferencias, aplican lo que se bautizaron como “sesgo del *statu quo*”. Encontraron que cuando tenemos que decidir entre varias opciones, tendemos a optar, a veces sin sentido, por aquellas por las que ya nos hemos decantado antes. En realidad, el caso de los umbrales no es una excepción, y este sesgo se ha mostrado determinante también a la hora de condicionar la evolución de la ciencia. Históricamente, los científicos, lejos de ser decodificadores objetivos de las evidencias empíricas, han orientado sus preferencias hacia las creencias científicas que ya tenían (Bohm y Peat, 1988; Hawking y Mlodinow, 2010; Kuhn, 1962). En esta línea, Max Planck dice en su autobiografía (Planck y Tixaire, 2000) que “*una nueva verdad científica no*

triunfa porque convenza a sus oponentes y les haga ver la luz, sino porque sus oponentes van muriendo, y una nueva generación crece familiarizada con la nueva teoría”.

Las ciencias del deporte evolucionan, pero siguen ancladas en supuestos tácitos y creencias de muy cuestionable validez y, a veces, buscando respuestas a exactamente las mismas preguntas que hace un siglo ¿Cómo mejoramos la condición aeróbica? ¿Cómo mejoramos el umbral anaeróbico? La falta de pensamiento crítico ha dificultado y sigue dificultando el avance en las ciencias del deporte, como pretende mostrar esta tesis.

El objetivo de esta tesis por compilación de artículos es triple:

- a) Revelar algunos de los procesos mediante los que se generan y estabilizan creencias limitadoras en investigación y práctica aplicada al entrenamiento deportivo,
- b) Posibilitar una mejor comprensión de los fenómenos relacionados con el deporte, en particular del entrenamiento deportivo y la prevención de lesiones, y
- c) Definir un marco teórico que nos permita: 1) sintetizar el conocimiento científico con principios generales, escapando del reduccionismo, la fragmentación y la descontextualización imperantes en ciencias del deporte, y 2) progresar en la búsqueda de leyes generales que sirvan para reformular los supuestos teóricos y prácticos vigentes, y que ayuden a generar nuevas hipótesis de investigación.

Para ello, los cuatro artículos que componen la tesis se centran en los siguientes objetivos específicos:

- Revisar algunas creencias y supuestos tácitos sobre los que la ciencia del deporte se sustenta,
- Estudiar la relación entre constreñimientos personales, ambientales y de la tarea que condicionan el rendimiento deportivo,
- Proponer una nueva clasificación de la perspectiva de los constreñimientos (constraints-led approach, CLA) que posibilite a una mejor comprensión de los conceptos de “tarea” y “constreñimientos de la tarea”,
- Estudiar la organización anidada en diferentes escalas temporales de los constreñimientos y su repercusión en la prevención de lesiones y el rendimiento deportivo,

- Proponer un modelo lesional basado en una comprensión del organismo como sistema dinámico complejo,
- Definir el impacto de los constreñimientos en la susceptibilidad de lesión en base a sus escalas temporales de actuación,
- Analizar las consecuencias teóricas, prácticas y metodológicas que supone el cambio de paradigma científico en el entrenamiento deportivo, huyendo de las “recetas” y proponiendo una mejor comprensión de las propiedades de los sistemas complejos neurobiológicos como base para intervenir de forma integrada, contextualizada y eficaz.

Estos objetivos se materializan en los cuatro artículos que forman la tesis por compilación:

- Balagué, N., Pol, R., & Guerrero, I. (2019). ¿Ciencia o pseudociencia de la actividad física y el deporte? *Apunts: Educación Física y Deportes*, (136), 129–136.
- Balagué, N., Pol, R., Torrents, C., Ric, A., & Hristovski, R. (2019). On the relatedness and nestedness of constraints. *Sports Medicine-Open*, 5(1), 1-10.
- Pol, R., Balagué, N., Ric, A., Torrents, C., Kiely, J., & Hristovski, R. (2020). Training or Synergizing? Complex Systems Principles Change the Understanding of Sport Processes. *Sports Medicine-Open*, 6(1), 1-13.
- Pol, R., Hristovski, R., Medina, D., & Balagué, N. (2018). From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review. *British Journal of Sports Medicine*, 0, 1-8.

1.3 Estructura de la memoria

“La creatividad se verá bloqueada mientras la ciencia continúe insistiendo en que un nuevo orden debe ser fructífero de manera inmediata”

David Bohm y David Peat

Godfrey Harold Hardy, considerado uno de los mejores matemáticos de nuestros tiempos, defiende con pasión en su libro *Apología de un matemático* (Hardy, 2019) la idea de que *“la “seriedad” de un teorema matemático radica, no en sus consecuencias prácticas, que son habitualmente insignificantes, sino en la importancia de las ideas matemáticas que conecta. Podemos decir que, más o menos, una idea matemática es “significativa” o importante si se puede conectar, de una forma natural y esclarecedora, con un gran complejo formado por otras ideas matemáticas... Las matemáticas “auténticas”, las de Fermat, Euler, Gauss, Abel y Riemann, son, casi en su totalidad, “inútiles”. No es posible justificar la vida de ningún matemático profesional auténtico sobre la base de la “utilidad” de su trabajo”*. Hardy, sin embargo, escribía esto desconociendo la tremenda paradoja que el destino le tenía reservada. En el mundo actual, tan dominado por la computación, sus aportaciones a la teoría de números y números aleatorios han resultado trascendentales para la criptografía y encriptado que, entre otras cosas, permiten salvaguardar la privacidad y seguridad de una infinidad de actividades como los correos electrónicos, las cuentas bancarias, o las compras online.

Esta curiosa historia sobre el pensamiento y trascendencia de Hardy nos deja algunas claras reflexiones. En primer lugar es buen ejemplo de que, generalmente, las verdaderas transformaciones o revoluciones científicas no surgen directamente como consecuencias prácticas. Más bien, a partir de estas nuevas concepciones se plantean nuevas preguntas y surgen nuevas realidades, para las que se acaban desarrollando aplicaciones inimaginables en el contexto anterior. Sin ir más lejos, la física, uno de los campos más prestigiosos e influyentes de la ciencia, se encuentra dominada por la relatividad general y la mecánica cuántica. Hasta nuestros días, las consecuencias prácticas de dichas teorías han sido prácticamente anecdóticas y, sin embargo, han supuesto un cambio radical en la forma de entender la física, permitiendo plantear una infinidad de nuevas preguntas sobre la naturaleza de nuestro universo, y posibilitando entender mucho mejor el mundo en el que vivimos. El desarrollo de estas teorías durante décadas ha permitido

que actualmente las empresas más potentes del mundo como Google o IBM luchan por conseguir lo que popularmente se conoce como supremacía cuántica, que promete cambiar el mundo de los datos y la computación tal y como lo conocemos (Arute y col., 2019). Sin embargo, este escenario y sus posibles aplicaciones jamás pudieron ser imaginados por los padres de la física cuántica cuando, a principios del siglo pasado, empezaron a describir el comportamiento cuántico de la energía. A su vez, los ingenieros de Google jamás habrían sido capaces de plantear dichos experimentos sin el camino recorrido por las generaciones precedentes.

Por tanto, entender mejor la naturaleza de los fenómenos con los que trabajamos puede ser entendido como el fin más potente y transformador de la ciencia. Y este ha sido precisamente el objetivo que he perseguido en el desarrollo de mi proceso de doctorado: mejorar la comprensión de la fenomenología deportiva. Como intento justificar a lo largo de la presente memoria y en los artículos publicados, esto implica necesariamente cambiar la concepción y planteamiento de la mayoría de supuestos básicos relacionados con el rendimiento y el entrenamiento. El proceso conlleva implícito un potencial de mejora de nuestras prácticas y del rendimiento de los deportistas enorme. Y aunque muchas de esas consecuencias prácticas aún no somos capaces ni de imaginarlas, la reordenación de los objetivos y criterios metodológicos del proceso de análisis y entrenamiento deportivo cambia desde ya, por completo, la teoría y la práctica del entrenamiento deportivo.

Este proceso que va de lo general a lo particular (y no al revés, como suele ser habitual en ciencias biológicas), aparentemente más lento y ambiguo pero realmente transformador, choca, en ocasiones, con las pretensiones cortoplacistas de los editores de las revistas más importantes del planeta. Sabedores de que aquellos trabajos con resultados claramente tangibles y con consecuencias prácticas supuestamente evidentes y concretas tienen más posibilidades de ser citados (Brito, Nassis, Seabra y Figueiredo, 2018). En este sentido, la necesidad de convencer a los editores y revisores de que los artículos que conforman la tesis merecían ser publicados en sus revistas, ha supuesto un proceso mucho más rico que lo que queda reflejado en cada uno de los trabajos. Especialmente por tres motivos.

Primero, por la constante reclamación de los revisores de aplicaciones prácticas más concretas. Por suerte, los trabajos experimentales desde la perspectiva de los sistemas

complejos llevan años desarrollándose y publicándose, de manera que empiezan a estar claras algunas consecuencias prácticas. Ampliar esas aplicaciones es uno de los objetivos principales de dos de los cuatro artículos publicados. Sin embargo, la comunidad científica está habituada a valorar aplicaciones muy concretas y a menudo universales o descontextualizadas. Es por ello que ha resultado imprescindible justificar una y otra vez que no se puede entender el comportamiento deportivo desvinculándolo de su entorno.

En segundo lugar, la fase de revisión de los artículos ha supuesto a menudo la confrontación de enfoques distintos de los fenómenos estudiados o, lo que es lo mismo, una confrontación entre los contenidos de los artículos y el *statu quo* dominante en ciencias del deporte. Debatir sobre diferentes supuestos, creencias, evidencias, teorías, hipótesis, y otras sutilezas con co-autores, colegas, investigadores, revisores y editores de gran prestigio internacional ha supuesto una de las experiencias más enriquecedoras del proceso de doctorado. En alguno de los casos, este proceso de discusión se ha prolongado durante varios años. Mediante argumentos científicos ha sido necesario convencer a algunos revisores para que reformulasen algunas de las premisas que impedían que pudiésemos entender el trabajo de la misma manera. Incluso, en dos casos hemos tenido que superar el examen de revisores extra incorporados a mitad del proceso. En ambos casos, la voluntad del editor para publicar el artículo parecía firme, y no se cuestionaba la calidad del material aportado. Sin embargo, la principal problemática residía en partir de paradigmas hasta cierto punto incompatibles entre sí y, especialmente, en la fortaleza y estabilidad con la que algunas evidencias (poco contrastadas) están fuertemente arraigadas. Actualmente el elemento subjetivo del conocimiento científico no viene dado por los sentidos (en los siglos XVII y XVIII eran los sentidos humanos los que proporcionaban la mayor fuente de información científica y ese era el principal elemento de subjetividad), sino por todo el esquema social y mental en el que se desarrolla la ciencia. Las teorías determinan el tipo de cuestiones que se plantean en los experimentos (Bohm y Peat, 1988), y ello genera prejuicios que dificultan la apertura hacia nuevos enfoques y, en algunos casos, impide evolucionar científicamente. Convencer a los revisores y editores sobre la necesidad de cambiar algunas de sus premisas, dejando atrás sesgos relativos al *statu quo*, ha requerido de un laborioso proceso sin el que, con toda probabilidad, los artículos no habrían podido ver la luz en su forma actual.

Por último, una de las mayores preocupaciones de los editores y revisores, aún dando su apoyo a la publicación de los trabajos, fueron las dificultades de comprensión que anticipaban en los lectores no expertos en la temática. Todo este proceso me ha llevado a incrementar mi sensibilidad y preocupación relativa a la dificultad de conseguir que los lectores se liberen de prejuicios a la hora de valorar el contenido de trabajos científicos.

Es por todo ello que la redacción de la presente memoria pretende: a) Sintetizar las aportaciones del conjunto de los artículos, b) facilitar la comprensión de sus contenidos para lectores no familiarizados con la perspectiva de los sistemas complejos, y c) profundizar en algunos aspectos que no han tenido cabida en los artículos, pero que han tenido un papel fundamental en la discusión con los revisores y editores. El marco teórico se centra pues en mostrar al lector, con datos que no aparecen en los artículos de la tesis, la necesidad de cuestionar los estudios científicos del ámbito de ciencias del deporte. Con este fin, se divide en 3 apartados:

- **2.1 Origen y evolución de los supuestos tácitos en ciencias del deporte.**

En él, a través del ejemplo del entrenamiento excéntrico, se ilustran algunos de los problemas epistemológicos que explican la prevalencia de prácticas “pseudocientíficas” en el entrenamiento deportivo. A su vez, este apartado sirve para introducir el artículo de la tesis *Ciencia o pseudociencia de la actividad física y el deporte*, en el que se analizan algunos de estos supuestos tácitos y creencias infundadas habituales, a la vez que se plantean medidas para contribuir a reducir la prevalencia de prácticas pseudocientíficas.

- **2.2 La perspectiva de los sistemas complejos y la teoría de los constreñimientos como base para un nuevo marco teórico y metodológico en entrenamiento deportivo.**

En este segundo subapartado se justifica la idoneidad de la perspectiva de los sistemas complejos y la teoría de los constreñimientos para comprender mejor los fenómenos relacionados con el deporte y generar nuevas hipótesis de investigación. Un nuevo planteamiento sobre la clasificación de los constreñimientos y sus interacciones anidadas temporalmente permite solventar algunos de los problemas empíricos apuntados en el apartado anterior. Además, mejora la comprensión de los procesos relacionados con el rendimiento deportivo y su entrenamiento entendidos de forma completamente integrada, tal como propone el segundo artículo de la tesis, titulado *On the Relatedness and Nestedness of Constraints*.

- **2.3 Consecuencias en el entrenamiento deportivo y la prevención de lesiones.** El tercer y último apartado sirve para justificar los motivos por los que no se ofrecen aplicaciones prácticas más concretas del modelo planteado, y para proponer una nueva concepción de los supuestos básicos de entrenamiento y la prevención de lesiones. Con ello se introduce el tercer (*Training or synergizing? Complex systems principles change the understanding of sport processes*) y el cuarto artículo (*From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review*) de la tesis.

Al finalizar este tercer apartado, se presentan los cuatro artículos que forman el cuerpo principal de la tesis, se plantea una discusión general, y se apuntan los retos de futuro y conclusiones de la tesis y del proceso de doctorado.

2.0 De dónde venimos y hacia dónde proponemos ir en entrenamiento deportivo

2.1 Origen y evolución de los supuestos tácitos en ciencias del deporte

“La ciencia no nos habla de la naturaleza: nos ofrece respuestas a nuestras preguntas sobre la naturaleza. Lo que observamos no es la naturaleza en sí misma, sino la naturaleza a través de nuestros métodos de preguntar”

Werner Heisenberg

Pitágoras de Samos, célebre matemático de la Antigua Grecia, fundó en el S. VI a.C. la Escuela Pitagórica. Su trascendencia, más allá de sus importantísimas contribuciones a las matemáticas, radica en su perspectiva de los números como átomos de los que están construidas todas las cosas. Ello convirtió a la escuela Pitagórica en la primera en exponer que la naturaleza está escrita en el lenguaje de las matemáticas. Uno de los supuestos teóricos más fundamentales de dicha escuela fue que los elementos de la naturaleza estaban formados por componentes que se ordenan en números enteros y racionales, a partir de los cuales se podía explicar todos los fenómenos del cosmos. Uno de los miembros más destacados de la comunidad, llamado Hipaso de Metaponto, demostró a sus compañeros durante un paseo en barca que la diagonal de un cuadrado no podía ser un número racional. Para dicha demostración se sirvió del proceso matemático más famoso del maestro: el teorema de Pitágoras. Hipaso acababa de poner en jaque algunos de los principios más fundamentales de la escuela, contradiciendo la doctrina pitagórica de que todos los fenómenos del universo se pueden reducir a números naturales y racionales. Aunque los números irracionales también son números, aceptar su existencia suponía cuestionarse a ellos mismos. Y a los Pitagóricos, lejos de percibir el descubrimiento como un nuevo avance, esa demostración les resultó muy incómoda, pues les obligaba a retractarse y revisar gran parte de su trabajo. Ante la disyuntiva entre defender su prestigio o *statu quo*, o defender la evidencia, decidieron cortar por lo sano y sacrificar al pobre Hipaso tirándolo por la borda haciendo que pareciera un accidente. De esta manera, Hipaso de Metaponto fue el primer científico de

la historia víctima del vigente principio bajo el que se trabaja en la ciencia moderna: “publicar o perecer” (Kline, 1985).

Desde la Antigua Grecia hasta la actualidad, el afán de algunos investigadores por proteger su legado, perjudicando el interés común y el avance hacia nuevos conocimientos, ha sido un problema endémico de la ciencia. Por ejemplo, durante siglos se trabajó en física sobre la premisa básica de la existencia del éter. Michelson y Morley probaron irrefutablemente en 1886, a través de un experimento que llevaba más de una década fraguándose, la imposibilidad de su existencia. Aparentemente este hecho debería haber provocado que el modelo del éter fuera abandonado. Sin embargo, la comunidad científica se esforzó intentando salvaguardar el concepto durante los siguientes 30 años, a través de adiciones artificiosas y *ad hoc* a sus modelos. Hawking y Mlodinow (2010) se preguntan ¿Cómo se podía creer en el éter a pesar de los resultados adversos del experimento de Michelson y Morley? El mismo Hawking (1993) sintetiza perfectamente el proceso que empujó a los pitagóricos, a los físicos, o a los científicos del deporte a seguir defendiendo teorías obsoletas *“en la práctica las personas son tremendamente reticentes a renunciar a una teoría en la cual han invertido mucho tiempo, de manera que suelen empezar por cuestionar la precisión de las observaciones realizadas. Si esto falla intentan modificar la teoría con adiciones ad hoc. Finalmente, esa antigua teoría se vuelve insostenible y alguien sugiere una nueva teoría en la que todas las observaciones se explican de manera elegante y natural”*.

Este sesgo, vigente no solo en el ámbito puramente científico, sino incluso en los propios planes de formación de los profesionales del deporte, limita la comprensión de diferentes fenómenos relacionados con el entrenamiento y promueve prácticas pseudocientíficas (Bailey, Madigan, Cope, y Nicholls, 2018). Es por ello que resulta de especial interés entender cómo emergen, evolucionan y se estabilizan los supuestos teóricos sobre los que se sustenta gran parte de la comprensión del rendimiento y entrenamiento contemporáneo. Para ejemplificar este proceso utilizaremos el ejercicio excéntrico, considerado por la mayoría de profesionales del deporte como la mejor estrategia para prevenir lesiones (Lago y col., 2020; McCall y col., 2014), aunque no exista evidencia sólida sobre su efectividad (Fanchini y col., 2020; Hibbert, Grant y Beers, 2008; McCall y col., 2015). El ejercicio excéntrico es un ejemplo idóneo para estudiar cómo, desde la ciencia básica, se generan supuestos que no son extrapolables a los modelos *in vivo* y

como la comparación de medias grupales tampoco nos permite entender para quién o en qué circunstancias puede ser útil la práctica de un determinado tipo de ejercicio.

Mecanismos *in vitro* o *in situ* se aceptan y reproducen sin valorar ajustadamente sus posibilidades de aplicación en otros contextos o escalas, y se asumen como válidos modelos experimentales que no son capaces de mejorar nuestra comprensión sobre cómo funcionan esos sistemas *in vivo*. Los modelos experimentales generalmente aspiran a establecer relaciones causa-efecto entre variables independientes y variables dependientes, por lo común comparando medias grupales a través de un análisis estadístico. En la mayoría de los casos, sin considerar en qué contexto se produce dicha relación ni cómo podemos explicar la gran variabilidad de los resultados obtenidos. Simplemente la ciencia acepta que algo es bueno para el humano “promedio”, aun cuando ese humano promedio no existe (Rose, 2016). Por desgracia, estos modelos experimentales se repiten de forma sistemática y sus resultados son aplicados sin estar acompañados de razonamiento crítico suficiente. Esto hace de la ciencia algo mecánico y que, a medida que avanza, amplifica sus sesgos sobre la individualidad (Sturmborg, 2019). A continuación, se analizará cómo funciona dicho proceso.

2.1.1 Cómo una bola de nieve en forma de extrapolación equivocada se convierte en una auténtica avalancha

“Las ideas se propagan igual que las enfermedades: trátalas a ambas con la misma precaución”

Nick Enfield

En el año 2003, en uno de los estudios pioneros y más citados sobre ejercicio excéntrico y prevención de lesiones (848 citas en Abril de 2020), Askling y col. (2003) justificaban la investigación de la utilidad del ejercicio excéntrico como medio para prevenir lesiones musculares de la siguiente manera *“Esta recomendación se ha basado en los experimentos realizados con músculos de animales, en los que se ha visto que un músculo más fuerte puede absorber más energía antes de romperse que un músculo menos fuerte (Garrett, 1990; 1996)”*. Los estudios de Garrett comprobaron que un músculo extirpado de un conejo, y estimulado para que se contrajera al máximo, no se rompía. En segundo lugar, comprobaron que cuando ese mismo músculo era estirado, sí eran capaces de llegar a romperlo. Finalmente constataron que, para llegar a esa longitud

en la que el músculo se rompía al ser estirado, había que aplicar más fuerza en forma de estiramiento cuando el músculo a su vez era estimulado para contraerse. Las conclusiones parecen claras. En primer lugar vemos que el músculo, por muy fuerte que se contraiga, no se rompe. Sí se rompe en cambio cuando se estira. Además, aunque haya que aplicar más fuerza para estirarlo hasta a la longitud a la que se rompe si el músculo es estimulado para contraerse a la vez que se estira, la longitud a la que se rompe el músculo es exactamente la misma. Por tanto, el músculo se rompe por la incapacidad de ese biomaterial de estirarse más allá de un umbral de longitud. De forma literal, Garrett (1996) afirma que *“Las lesiones musculares son el resultado de un estiramiento excesivo...Los músculos tienen un umbral de tensión para las lesiones pasivas y activas”*. No obstante, Garrett (1990) ya apunta algunas de las limitaciones de sus estudios, como que en condiciones normales *“es evidente que las lesiones no se producen después de una tensión relativamente constante en el músculo”*. Además, sus experimentos mostraron que las lesiones que se producían al estirar el músculo ocurrían en la zona de la unión miotendinosa, en cambio *“los extremos de las fibras musculares, cerca de la unión músculo-tendón, no se tensan tanto como las áreas centrales de la fibra. En estos momentos no queda claro porqué estas se tensan menos y en cambio son más susceptibles a las lesiones”* (Garrett, 1990). Garrett (1996) reconoce también que *“la fuerza necesaria para causar una lesión fue equivalente a varias veces la fuerza producida normalmente durante una contracción isométrica máxima”*. Con lo cual, aunque la conclusión del estudio es que la causa de la ruptura del músculo es su incapacidad para soportar la tensión excéntrica, los mismos autores reconocen que, inexplicablemente, el músculo no se rompe donde sufre más tensión. Admiten también que el tipo de tensión continua aplicada para romper el músculo no tiene nada que ver con la tensión discontinua que se da en los músculos cuando se produce una lesión y, finalmente, que la fuerza que tuvieron que aplicar para romperlo es superior a la que el músculo es capaz de generar en condiciones normales. Aun así, como vemos, con el ejemplo de Askling y colaboradores, no hay problema en asumir la conclusión final: el músculo se rompe cuando se estira y, si mientras se estira se contrae con fuerza, cuesta más romperlo.

Butterfield (2010) analizó los estudios de Garrett y advirtió que la hipótesis de que el músculo se rompía al ser estirado partía de estudios realizados *in vitro* e *in situ*, y que dichos hallazgos no han sido reproducidos mediante metodologías *in vivo*. Aunque para un análisis más completo se recomienda la lectura de la referencia mencionada, hay algunos elementos que por su sencillez y contundencia merecen la pena resaltar. Es

cierto que el músculo en los protocolos *in situ* e *in vitro* se rompe cuando se estira, y que a pesar de las evidentes limitaciones, parece que la causa es que se alcanza cierto umbral de estiramiento que ese biomaterial no es capaz de soportar. Sin embargo, cuando se analiza con mayor profundidad, vemos que esa rotura se produce con un solo estiramiento que supera en un 60% el estiramiento que soporta el músculo en el rango fisiológico (Brooks, Zerba y Faulkner, 1995). Es decir, el músculo teóricamente se rompe por un estiramiento excesivo, pero estirando el músculo dentro del rango fisiológico, este jamás se rompió en los estudios llevados a cabo por Garrett. Además, la rotura se producía normalmente tras un solo estiramiento de magnitud, como acabamos de ver, desmesurada, cuando en la práctica deportiva la lesión se produce habitualmente por acciones ordinarias repetidas con anterioridad miles de veces sin haber causado lesión observable (Pol y col., 2018). Asumir la equivalencia entre ambas situaciones sería como si en mecánica se infirieran a partir de los *crash test* (las típicas imágenes de accidentes de colisiones frontales con maniqués en el interior utilizadas para comprobar la resistencia de las estructuras del coche), conclusiones sobre cómo se desgastan los componentes del vehículo en su uso cotidiano.

Si la ciencia no es valorada con pensamiento crítico se puede incurrir en el alto riesgo de extraer conclusiones precipitadas y/o equivocadas. Probablemente, uno de los grandes problemas es que se utilizan las conclusiones de los estudios de forma sistemática, inundando la bibliografía de publicaciones que estabilizan una determinada creencia sin analizarla en profundidad. Sin ir más lejos, los dos trabajos de Garrett han sido citados un total de 1354 veces (Abril de 2020), lo que los convierte en dos de los artículos más citados de la historia de las ciencias del deporte. A través de este proceso se pueden generar décadas de confusión y centenares de estudios basados sobre una hipótesis infundada.

En este sentido se ha visto como los primeros artículos en un campo (como puede ser la etiología de las lesiones musculares) generalmente reciben, independientemente de la calidad del contenido, citas a un ritmo enormemente superior a los artículos publicados más tarde (Newman, 2009). Además, el mismo estudio muestra como esta ventaja competitiva es comúnmente perpetuada, y artículos de baja calidad científica, pero pioneros en el momento de su publicación, siguen recibiendo muchas más citas que artículos de mayor calidad escritos más tarde. Los artículos de Garrett, escritos en una época en la que se venía especulando con la posibilidad que el estiramiento

excesivo fuera la causa de las lesiones musculares (Krejci y Koch, 1979; Radin y col., 1979; Zarins y Ciullo, 1983), fueron los primeros en “comprobarlo” y parecen un ejemplo paradigmático de lo que Newman llama “*first-mover advantage*”. Este proceso se ve además potenciado por la retroalimentación positiva que se produce hacia aquellos artículos con muchas citas (Barabási y Albert, 1999; Mokryn y col, 2016). Estos procesos conllevan implícitos un alto riesgo de sesgo sistémico que solo es combatible mediante un análisis concienzudo y escéptico de las tendencias actuales. Investigar no debería presuponer la aceptación de premisas recurrentemente admitidas, sino la evaluación crítica de su validez, así como de la necesidad de formular nuevas hipótesis. De lo contrario, como ha sucedido durante las últimas décadas, la investigación y práctica en prevención de lesiones se circunscribe a las hipótesis que pueden surgir a raíz del modelo de Garrett.

Decía el célebre antropólogo francés Claude Lévi-Strauss que “*el científico no es aquella persona que da las respuestas correctas, sino aquel que formula las preguntas idóneas*”. En la medida en que la ciencia experimental es tan solo capaz de responder a las preguntas que los científicos plantean, la mejor manera de evolucionar significativamente en el conocimiento a través de experimentos es la de mejorar la comprensión de los fenómenos y formular nuevas hipótesis que puedan ser debidamente testadas. La actualización de la ciencia básica resulta pues indispensable para la evolución de la ciencia aplicada. De lo contrario, la ciencia se convierte en un simple mecanismo mediante el cual se reproduce el conocimiento existente.

2.1.2 Escoja bien su estrategia y podrá demostrar que la tierra es plana con total significatividad estadística

“Si su experimento necesita estadística, debería haber hecho un experimento mejor”

Ernest Rutherford

El pasado 20 de marzo de 2019 se publicó un artículo en la revista Nature (Amrhein, Greenland y McShane, 2019) que consiguió el mayor índice de atención jamás identificado en un artículo hasta la fecha (Goodchild van Hilten, 2019). En él, los autores, apoyados por 850 signatarios (académicos de diferente perfil), aseguran que el mal uso de la significación estadística ha hecho mucho daño a la comunidad científica y a quienes confían en el asesoramiento científico. Los errores en la simplificación de

medidas de significación estadística llevan a los autores de la mayoría de los artículos publicados a concluir y replicar conclusiones que pueden llevar a mal interpretar el verdadero significado de la evidencia científica (Amrhein, Trafimow y Greenland, 2019). Incluso, Amrhein, Korner-Nievergelt y Roth (2017) muestran como, a través de esas interpretaciones simplistas y dicotómicas (significativo o no significativo) usadas en la mayoría de publicaciones, se podría justificar que la tierra es plana con total significatividad estadística ($p < 0,05$).

Tradicionalmente, una $p < 0,05$ se ha considerado una garantía ante el azar, y por tanto un garante de la replicabilidad. Sin embargo, existen ejemplos bien documentados que demuestran que la significación estadística puede ser obtenida a partir de “puro ruido” (Bem, 2011; Carney, Cuddy y Yap 2010). Consecuentemente, como hemos comentado en el caso inicial de los umbrales, la tasa de replicación se vuelve muy baja (Ioannidis 2005; Smaldino y McElreath 2016). La propuesta de abandonar la significación estadística, tal y como se entiende hoy ha sido defendida por eminentes estadísticos a lo largo de las últimas décadas. Fisher, que fue pionero proponiendo la significatividad estadística (Fisher, 1926), decía en su último libro que *“ningún científico debe tener un nivel fijo de significatividad que año tras año, y en cualquier circunstancia, le permita rechazar una hipótesis (nula); más bien debería centrarse en cada caso en particular a la luz de su evidencia y de sus ideas”* (Fisher 1956; Greenland and Poole 2013). Otros estadísticos como Pearson (Hurlbert y Lombardi 2009), Cox (Cox y col., 1977) o Lehmann (Lehmann 1993; Senn 2001), así como investigadores no estadísticos (Amrhein, Korner-Nievergelt y Roth 2017; Amrhein y Greenland 2018; Boring 1919; Drummond 2016; Eysenck 1960; Lemoine y col..2016; Skipper, Guenther y Nass 1967), han promulgado la necesidad de abandonar este método. Además, esta proposición es plenamente consistente con la posición de la “American Statistical Association” sobre significatividad estadística y los valores “ p ”: *“Las conclusiones científicas y las decisiones comerciales o políticas no deben basarse solo en si un valor “ p ” supera un umbral específico. Los investigadores deben valorar muchos factores contextuales a la hora de derivar inferencias científicas, incluyendo el diseño del estudio, la calidad de las medidas, la evidencia externa del fenómeno estudiado y la validez de los supuestos que subyacen en el análisis de los datos”*. En su análisis no hacen referencia únicamente a los valores “ p ”, sino al mal uso en general que se hace de la estadística en las publicaciones científicas, y advierten que *“ningún índice único debe sustituir al razonamiento científico”* (Wasserstein y Lazar, 2016). Por tanto, las medidas puramente estadísticas no deberían ser suficientes 26

(como habitualmente son) para generar evidencia, ni deberían tener prioridad sobre otros factores actualmente subordinados, como por ejemplo, la evidencia previa relacionada con el descubrimiento, la plausibilidad del mecanismo observado, el diseño del estudio, la calidad de los datos, la novedad del hallazgo y otros muchos factores que dependerán del ámbito de la investigación (McShane y col., 2019).

Las reclamaciones de la comunidad científica para un cambio de paradigma, aunque no son nuevas (Meehl, 1978) y se han vuelto insistentes en los últimos años (Sturmburg, 2019), no han logrado implementarse (McShane y col., 2019), y toda esta problemática se ve perfectamente reflejada en la investigación sobre la utilidad de las estrategias de prevención de lesiones. Las revisiones sistemáticas realizadas coinciden en señalar la baja calidad metodológica de los estudios encontrados (Bricca y col., 2018; Fanchini y col., 2020; Hibbert y col., 2008; McCall y col., 2015) y la imposibilidad en los estudios de aislar los efectos de las intervenciones evaluadas, lo que hace inviable la inferencia de conclusiones a partir de los datos obtenidos (Bricca y col., 2018; Fanchini y col., 2020; Goode y col., 2015; Hibbert y col., 2008; McCall y col., 2015), así como altos riesgos de sesgo (Bricca y col., 2018; Fanchini y col., 2020; Goode y col., 2015). En una reciente revisión sistemática, Fanchini y col. (2020) corroboran que los trabajos examinados *“no solo no tratan de estimar las relaciones causales, sino que como estudios descriptivos observacionales incurren también en altos riesgos de sesgo, limitando la posibilidad de hacer cualquier tipo de inferencia de sus resultados”*. No obstante, observamos como el principal problema de la ciencia inductiva analítica es que, a pesar de estas limitaciones perfectamente medibles y observables, cuando se analiza críticamente la evidencia existente, se produce una gran complacencia y connivencia para que los resultados que cumplen con ciertos parámetros de validación estadística, independientemente de los graves sesgos en los que puedan incurrir, sean continuamente validados mediante la citación en estudios que asumen su validez.

En algunos casos, además de los sesgos clásicos a los que hacen referencia estas revisiones, el diseño experimental puede conllevar implícitos sesgos específicos que invalidan completamente las conclusiones del resultado. Retomando el ejemplo del ejercicio excéntrico, un sesgo potencial puede ser la diferente participación de cada jugador en la competición, dado que la incidencia lesional es 10 veces mayor en competición que en entrenamiento (Ahmad y col., 2014; López-Valenciano y col., 2019). Ninguno de los trabajos analizados en ninguna de las revisiones sistemáticas estudiadas

usa ningún tipo de corrección para este sesgo. En algunos casos se facilita incluso que esto suceda. En Seagrave y col. (2014) se realiza el estudio con todas las categorías de jugadores de una franquicia de la Major League Baseball, siendo el grupo control los 40 jugadores del primer equipo, y el grupo intervención los jugadores de las demás categorías. Existen evidencias que la edad aumenta la incidencia de lesiones en los “isquios”¹ (Freckleton y Pizzari, 2013) y que a mayor exigencia competitiva mayor probabilidad también de lesión (Buchheit y col, 2019). Los equipos profesionales, además de verse claramente perjudicados por estas dos variables, suelen tener unos calendarios mucho más congestionados que los equipos de formación, algo que también se sabe que aumenta el riesgo de lesión (Bengtsson , Ekstrand y Hägglund, 2013; Bengtsson, Ekstrand, Waldén y Hägglund, 2017). Teniendo en cuenta que todas estas variables (exposición a la competición, densidad competitiva, intensidad competitiva y edad) tienen una sólida evidencia científica que las vincula al aumento de la probabilidad de sufrir una lesión, es lógico pensar que pueden afectar al papel del ejercicio excéntrico en los grupos control y experimental. Sin ir más lejos, de las 10 lesiones registradas en el estudio de Seagrave y col., nueve son en competición y una en entrenamiento, lo que correlaciona perfectamente con las estadísticas descritas en los estudios (Ahmad y col., 2014; López-Valenciano y col., 2019). Los resultados del estudio de Seagrave y col. son significativos ($p=0,038$), pero sirven para ilustrar que ningún valor de “ p ”, un factor de Bayes o cualquier otra medida estadística o no estadística, es capaz de eliminar la subjetividad y los sesgos de un estudio (McShane y col, 2019).

Otro de los principales problemas de los diseños experimentales inductivos analíticos es que, aunque fuéramos capaces de corregir los diferentes sesgos y valorar los efectos de una intervención como la del ejercicio excéntrico, seguiría resultando imposible aislar las consecuencias de dicha intervención de las consecuencias del resto de actividad que necesariamente siguen desarrollando los deportistas. Recientemente, algunos estudios

¹ En la literatura internacional se usa el término *hamstring* para hacer referencia a la musculatura de la cara posterior del muslo, lo que incluye el músculo semimembranoso, el semitendinoso y el bíceps femoral. En lengua española la palabra más comúnmente usada es isquiotibiales, aunque es una denominación incorrecta ya que su etimología hace referencia a los músculos que se originan en los isquiones y se insertan en la tibia. Este no es el caso del bíceps femoral ya que se inserta en la cabeza del peroné, y solo su cabeza larga se origina en los isquiones, mientras que la corta lo hace en el propio fémur. Otras nomenclaturas como isquiosurales o isquiocurales tampoco recogen el conjunto de la musculatura que forma lo que en inglés entendemos como *hamstring*. En el jerga profesional es muy común el uso de “isquios” para hacer referencia al conjunto de la musculatura de la cara posterior del muslo, así que entendiendo que es la única palabra en castellano que recoge el conjunto de la musculatura a la que se pretende hacer referencia, de aquí en adelante se usará “isquios” como alternativa española a *hamstring*.

han mostrado como un entrenamiento de sprints provoca mayores modificaciones en la arquitectura muscular que la realización de Nordic Hamstring (NH) en futbolistas, siendo solo la magnitud de las modificaciones observadas por el entrenamiento de sprints significativa al propósito de prevenir lesiones (Mendiguchia y col., 2020). En el estudio de Seagrave y col., el grupo intervención realizó de media 3,5 repeticiones por semana del NH. Las cargas de NH utilizadas por Mendiguchia y col., así como las de los demás estudios que han observado modificaciones en la fuerza o la arquitectura muscular (Bourne y col., 2018), fueron mucho mayores (generalmente llegando a cargas de 90/100 repeticiones por semana, lo que significa una diferencia de más del 2500%). Esto convierte en totalmente improbable que, los mecanismos que actualmente se han descrito como plausibles para que el NH proteja de una lesión, como son la modificación de la arquitectura y la fuerza excéntrica (Bahr, Thorborg y Ekstrand, 2015), sean el motivo de la reducción de lesiones observadas por Seagrave y col. Además, sabemos que cuatro de cada cinco lesiones de “isquios” se producen en la porción larga del bíceps femoral (Borne y col., 2018; Méndez-Villanueva y col., 2016) y que el NH (con dosis mucho mayores que las de Seagrave y col.), apenas tiene efecto en esa zona muscular (Bourne y col., 2018; Kubota, Ono y Fukubayashi, 2007; Malliaropoulos y col., 2012; Méndez-Villanueva y col., 2016). Por tanto, no deberíamos aceptar, con independencia de la significatividad estadística, que 3,5 repeticiones de NH a la semana reducen casi por completo (97%) las lesiones de “isquios”. Hacerlo supondría aceptar que casi todo lo que sabemos sobre fisiología, arquitectura muscular y entrenamiento tiene que ser replanteado, pues no tenemos forma, con los conocimientos actuales, de justificar algo semejante.

Las lesiones cuestan al año la friolera de un billón (americano) de dólares a los equipos de la Baseball Major League (Whiteley, 2016). Además, las lesiones de “isquios” no solo son las más habituales en el baseball (Ahmad y col., 2014; Camp y col., 2018), sino que han aumentado significativamente durante los últimos años (Okoroha y col., 2019) ¿Son estúpidos entonces los equipos y no ven que haciendo 3,5 repeticiones por semana del NH evitarán casi el 100% de esas lesiones? Aceptar la existencia de este tipo de soluciones milagrosas, que con una simple intervención solucionan una grave problemática, parece algo más relacionado con las denostadas dietas milagro que con la comunidad científica. Sin embargo, como veremos a continuación, esto no es así.

2.1.3 Descifrando el enigma: mismas evidencias, diferentes interpretaciones

“El peso de la evidencia para una afirmación extraordinaria debe ser proporcional a su rareza”.

Pierre-Simon Laplace

Las revisiones sistemáticas son investigaciones científicas en las cuales la unidad de análisis son los estudios originales primarios, es decir, experimentos como los que acabamos de analizar. Constituyen una herramienta muy común que tiene la finalidad de sintetizar la información científica disponible comparando los resultados de diferentes estudios sobre una misma temática e identificar áreas de incertidumbre donde sea necesario investigar. Sin embargo, la realización de una revisión sistemática de calidad no es una tarea sencilla, como en ocasiones tampoco lo es su interpretación (González, Urrútia y Alonso-Coello, 2011), y como nos advierten Weir, Rabin y Arden (2016) no es oro todo lo que reluce. En primer lugar, los autores nos advierten que la calidad de cualquier revisión sistemática o metanálisis es solo tan buena como la calidad de los estudios que contiene. Sumar y analizar artículos con un alto riesgo de sesgo no elimina ese riesgo, sino que lo amplifica, lo cual es muchas veces subestimado (Stegenga, 2011; Weir, Rabin y Arden, 2016). Los metanálisis no limitan adecuadamente las evaluaciones intersubjetivas de las hipótesis, lo que explica cómo múltiples metanálisis de la misma evidencia primaria pueden llegar a conclusiones contradictorias con respecto a la misma hipótesis (Ezzo y col, 2001; Stegenga, 2011).

En ciencias del deporte hay varios trabajos que analizan la calidad de las revisiones sistemáticas existentes y, como no podía ser de otra manera al disponer de estudios de baja calidad, los resultados no son muy halagüeños. DiSilvetto y col. (2016) analizaron 200 revisiones sistemáticas y más de la mitad (53%) solo contenían estudios de la más baja calidad de evidencia (nivel 4 o 5 sobre 5, siendo 1 el mayor nivel de evidencia). La nota media de las revisiones fue 8 sobre 11 (siendo 1 el valor de mayor evidencia). En este sentido, Weir, Rabin y Arden (2016) nos advierten de algo fundamental y tantísimas veces olvidado cuando hablamos de revisiones sistemáticas en revistas de alto impacto, *“los lectores deben evaluar críticamente las revisiones sistemáticas y los metanálisis por sí mismos”*. DiSilvetto y col. (2016) añaden que los lectores *“deben ser conscientes de las carencias y limitaciones cuando lean las revisiones sistemáticas y hagan uso de ellas en la práctica”*. Es decir, la ciencia no solo debe ser aceptada y creída como dogma de fe, sino

abordada y críticamente analizada. Incluso cuando hacemos referencia al considerado como “platinum standard” (Stegenga, 2011) de la evidencia científica: la revisión sistemática con metanálisis publicada en una revista con alto factor de impacto.

Siguiendo con el ejemplo del ejercicio excéntrico, veamos cómo una revisión de este tipo puede generar evidencias falsas. Existen numerosas revisiones sistemáticas con metanálisis que evalúan la validez del ejercicio excéntrico para la prevención de lesiones musculares (Fanchini y col., 2020; Goode y col., 2015; Hibbert O, Grant A & Beers, 2008; McCall y col., 2015), y que coinciden a la hora de señalar que los estudios analizados no permiten afirmar que el ejercicio excéntrico sea efectivo a la hora de reducir el número de lesiones. Sin embargo, recientemente ha aparecido una revisión sistemática con metanálisis (Van Dyk y col., 2019) que con prácticamente la misma base de estudios que los demás, afirma que el entrenamiento excéntrico (en concreto el NH) disminuye las lesiones de “isquios” a la mitad ¿Cómo puede una revisión que prácticamente dispone de la misma base de estudios que los demás mostrar unos resultados tan extraordinarios y dispares?

Veamos algunos ejemplos de cómo lo consiguen. El estudio de Silvers-Granelli y col. (2015) es uno de los quince que analizan Van Dyk y col. En dicho estudio se evalúa si el calentamiento FIFA11+, que consiste en 15 ejercicios de calentamiento, uno los cuales es el NH (del que se propone realizar entre 3 y 5 repeticiones) reduce el número de lesiones observadas. Efectivamente, el estudio reporta un descenso del 63% en las lesiones en el grupo que realiza dicho calentamiento en comparación al grupo control. Ahora bien, atribuir tal efecto a las 3 repeticiones del NH parece una conclusión precipitada, de la que para darse cuenta no hace falta ningún tipo de formación científica. A modo de anécdota, en el trabajo de Silvers-Granelli y col. (2015) ni siquiera aparecen en el cuerpo del trabajo ni en las referencias bibliográficas las palabras “Nordic Hamstring”. Pues bien, en cinco de los quince estudios analizados por Van Dyk y colaboradores se analiza la validez del FIFA 11+, y otros cinco combinan el NH con otras intervenciones en el grupo experimental. De esta manera, aunque solo un tercio de los estudios analizados (entre los que se encuentran estudios con riesgo de sesgo muy elevado, como el analizado en el capítulo anterior de Seagrave y col.) intenta valorar de forma exclusiva la efectividad del NH en la prevención de lesiones, los resultados de los quince estudios son atribuidos exclusivamente al NH y usados para para promediar su efecto de forma ponderada al tamaño de la muestra de cada estudio. Esto les permite obtener unos resultados que

llevan a los autores a afirmar que *“El Nordic Hamstring esencialmente reduce a la mitad la tasa de lesiones en los “isquios” en múltiples deportes”*. Sin duda, parece una afirmación imprudente, irreflexiva y poco basada en la evidencia objetiva. Aunque el trabajo de VanDyk y colaboradores está publicado en la revista más citada en ciencias del deporte, los autores simplifican su análisis a (como advertían Sturmberg y Topolski (2014) o McShane y col. (2019)) localizar estudios que analizan la relación entre el NH y las lesiones de “isquios” con resultados validados estadísticamente a partir de la comparación entre grupos. En este caso, con el agravante de que solo un tercio de los mismos tienen el propósito de estudiar dicha relación y que los que realmente tienen ese propósito incurren en altísimos riesgos de sesgo. Por tanto, una revisión sistemática con metanálisis, a pesar de tener resultados estadísticamente significativos y estar publicada en una revista de alto impacto, debe ser revisada en detalle porque es posible, como en este caso, que no solo no elimine los sesgos individuales de los estudios, sino que los amplifique, estabilizando la creencia de que el ejercicio excéntrico funciona sin aportar evidencias de ello.

Otra de las problemáticas que observamos es la frecuente falta de análisis de la heterogeneidad de resultados. VanDyk y col. advierten que se encuentra una alta heterogeneidad ($I^2=74\%$), pero simplemente lo mencionan. En el cuerpo de estudios aparecen desde trabajos que dicen que el NH reduce el 97% de las lesiones (Seagrave y col., 2014), a estudios que dicen que el NH aumenta un 21% su incidencia (Engebretsen y col., 2008). Aún si ignoráramos todos los problemas metodológicos anteriormente descritos, y asumiéramos que esos resultados muestran el efecto del ejercicio excéntrico sobre las probabilidades de sufrir lesiones, tendríamos un problema aún mayor. ¿Por qué en algunas condiciones es positivo y en otras negativo el rol del ejercicio excéntrico? La realidad es que la literatura científica no nos permite responder a esta pregunta. El diseño experimental que siguen los estudios analizados, que simplemente busca diferencias entre medias grupales, nos limita a la posibilidad de responder a la pregunta de si una intervención tiene un buen efecto promedio, sin posibilidad de entender en quién o en qué condiciones podría hacerlo o no (Sturmberg, 2019). No solo con el ejercicio excéntrico, sino en general, la mayoría de estudios arrojan efectos muy heterogéneos (McShane y col., 2019), pero si no aceptamos y analizamos la variabilidad de condiciones y la variación en los efectos como base del estudio (Carlin, 2016; Gelman, 2016), y no como mero valor anecdótico una vez obtenida una significatividad estadística, es imposible que mejoremos la comprensión de para quien o en qué condiciones puede

funcionar una intervención (McShane y col., 2019). Probablemente, contextualizando las consecuencias de nuestras intervenciones estaríamos recogiendo el verdadero potencial de un estudio. Sin embargo, los diseños experimentales obvian frecuentemente la dinámica de los contextos.

Otro problema frecuente que encontramos a la hora de utilizar las diferencias que se determinan a través de las pruebas de significación estadística es el uso de distribuciones normales, cuando dichas distribuciones son raras en los sistemas naturales y sociales, y eso tiene consecuencias importantes a la hora de analizar los resultados que obtenemos (Sturmborg, 2019; Taleb, 2019). Las distribuciones normales pueden ser caracterizadas por su “media” y “varianza”. Sin embargo, las distribuciones no lineales siguen generalmente un patrón de distribución logarítmico normal o de ley de potencia inversa, y no tienen promedio que pueda ser asumido como representativo de las características típicas de la distribución y tampoco desviaciones normales finitas sobre las que basar los intervalos de confianza (Andriani y McKelvey, 2009). Interpretar los efectos de una manera u otra tiene consecuencias importantísimas en la estimación de probabilidades, pues en una ley de potencia inversa alrededor del 20% de la población puede mostrar el 80% del efecto, de manera que estamos promediando un efecto inexistente o contraproducente para el 80% de la población. Por ejemplo, en la relación entre tensión arterial y mortalidad, el modelo *gaussiano* ha dado lugar a la creencia errónea de "cuanto más baja, mejor", pero sobreestima el riesgo de muerte por hipertensión de hasta el 70% de la población (Port y col., 2000).

2.1.4 Necesitamos cambiar el *statu quo* en las ciencias del deporte

“Si difundimos sin crítica los supuestos de la periodización, debido a una lealtad errónea a la tradición, estamos perpetuando obstinadamente una lealtad equivocada a una realidad distorsionada”

John Kiely

Hemos visto como, desde la ciencia básica hasta las revisiones sistemáticas, pasando por la ciencia experimental, existen mecanismos que nos pueden llevar a conclusiones erróneas que, con el tiempo, se conviertan en axiomas compartidos entre deportistas y profesionales. Ello permite la proliferación y prevalencia de ideas pseudocientíficas y

“neuromitos” entre las entrenadoras y entrenadores, así como en los contenidos de los planes de estudio de las instituciones encargadas de formar a dichos profesionales. Se consideró en este sentido de vital importancia el desarrollo de un primer artículo en el que se identificaran y discutieran algunas creencias, prejuicios y supuestos tácitos comunes en el ámbito de las ciencias de la actividad física y el deporte que podían favorecer la presencia de pseudociencia en la formación y la práctica profesional, como son: (a) el deporte es un fenómeno demasiado complejo para ser estudiado científicamente; (b) el deporte necesita ciencia aplicada; (c) en el deporte, la práctica y la experiencia son más importantes que la teoría; (d) todas las teorías tienen parte de verdad y son igualmente aceptables; (e) hay “hard sciences” (biológicas) y “soft sciences” (sociales).

En relación con los argumentos que se exponen, se recomiendan algunas intervenciones dirigidas a las instituciones y organismos responsables de la formación de profesionales de la actividad física y el deporte como son: a) revisar la calidad del material docente de los programas de formación en base a los indicadores de calidad científica, b) evitar proporcionar recetas prácticas sin asociarlas a teorías científicas actualizadas, c) introducir el desarrollo de teorías científicas desde una perspectiva histórica para promover la adquisición de un pensamiento crítico en el alumnado, d) ayudar al alumnado a distinguir ciencia de pseudociencia, e) promover mentes abiertas hacia nuevos modelos y teorías científicas, f) alimentar la formación en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte (CAFD) de los avances que están en la vanguardia de la ciencia y no limitarse al conocimiento tradicional hegemónico de las disciplinas científicas, g) desarrollar perfiles profesionales práctico-científicos y fomentar la colaboración interdisciplinaria y h) valorar tanto la investigación básica como la aplicada en el desarrollo de las CAFD y valorar el deporte como un fenómeno del que se pueden extraer leyes fundamentales para la ciencia en general.

Además, debemos ajustar los métodos de investigación para evitar potenciar el desarrollo de conclusiones basadas en sesgos y relaciones espurias. En ciencias del deporte, y especialmente en fisiología del ejercicio, es muy habitual focalizar los objetivos en encontrar inferencias estadísticas entre procesos a nivel celular y macroscópicos (p.e., tensión excéntrica-lesión, ácido láctico-fatiga) e ignorar el carácter dinámico de los mecanismos investigados (Balagué y col., 2020; Eissing y col., 2011). Los procesos de investigación y desarrollo del conocimiento científico que hemos ilustrado con las

lesiones y la fatiga no son una excepción, sino un ejemplo más de la tendencia general en el estudio de los fenómenos deportivos (Hristovski y col., 2016).

Observando esto, se podrían considerar dos opciones para mejorar la evidencia en la que se basan nuestras prácticas. Una opción sería mejorar los métodos inductivos proponiendo diseños de investigación que solventen las limitaciones observadas. Otra opción es aumentar la evidencia de base predominantemente deductiva, y es a ello a lo que se dedicarán el resto de artículos de la tesis. Con este fin ha sido necesario, en primer lugar, encontrar un marco teórico de ciencia básica y de carácter suficientemente general para explicar los principios que subyacen al comportamiento de los sistemas neurobiológicos, considerando sus múltiples dimensiones, y capaz de proporcionar un conocimiento sintético de los fenómenos a estudiar.

2.2 La perspectiva de los sistemas complejos y la teoría de los constreñimientos como base para un nuevo marco teórico y metodológico en entrenamiento deportivo

“La naturaleza es muy compleja, pero las leyes que la gobiernan son muy sencillas”.

Juan Martín Maldacena

El 23 de diciembre de 1971, en el National Cancer Act, el presidente de los Estados Unidos Richard Nixon declaró la guerra al cáncer firmando una ley que proporcionaba cantidades de recursos jamás vistas en la investigación médica, con la esperanza que en los años venideros se encontraría su cura definitiva. Desde entonces, el cáncer se ha convertido en el fenómeno más estudiado de la biología, con más de 100 billones de dólares invertidos (Weinberg, 2013) y generando 1.597.745 publicaciones en PubMed durante los últimos 10 años, lo que arroja una media de 438 publicaciones diarias. Sin embargo, la incidencia global del cáncer está creciendo y muchas de las preguntas planteadas hace casi 50 años siguen abiertas (Lichtenstein, 2019). Al mismo tiempo, las lesiones de “isquios” no paran de aumentar en aquellos deportes con más recursos. En tan solo una década se han incrementado más de un 25% por cada mil horas en fútbol (Ekstrand, Waldén y Hägglund, 2016) y un 20% en Baseball (Okoroha y col., 2019). Observamos que, tanto en medicina como en ciencias del deporte, en algunas de las cuestiones a las que mayores recursos se han dedicado en las últimas décadas apenas se han podido tener avances significativos. Estas muestras de fatiga en algunas estrategias y métodos de investigación reclaman una revisión.

Hristovski y col. (2016) analizaron las principales características de la investigación en ciencias del deporte y observaron una acuciante 1) falta de investigación inter- y transdisciplinaria; 2) papel dominante de la ciencia biológica más clásica, y 3) hegemonía de las metodologías experimentales que, apoyándose en la estadística inferencial, buscan relaciones de causa-efecto y de abajo arriba, es decir, del nivel micro al macroscópico. Con independencia del campo de investigación, vemos como por muchos recursos que se dediquen al estudio de un problema complejo, si se hace de manera fragmentada, especializada y descontextualizada, dificultando la comunicación y generación de sinergias entre científicos e ignorando los principios sistémicos que subyacen a los fenómenos estudiados, avanzar se vuelve un proceso quimérico (Balagué y col., 2017;

Balagué y col., 2020). La evidencia nos indica que algunas metodologías están mostrando claras limitaciones en su potencial para mejorar la comprensión de los fenómenos estudiados, y una bajísima eficiencia en la relación entre recursos invertidos y beneficios obtenidos.

La perspectiva de los sistemas complejos nos permite descubrir, a través de unas mismas leyes dinámicas, principios comunes que se reproducen, no solo a diferentes escalas en los sistemas vivos (Hristovski y col., 2010), sino incluso en la materia inanimada (Shinbrot y col., 1992). Nuestro mundo está constituido por fenómenos dinámicos dependientes del contexto, con invariancia de la escala a la que realicemos la observación. La perspectiva de los sistemas complejos (Davids y col., 2012) no solo nos permite estudiar la naturaleza dinámica y contextual de estos fenómenos, sino que permite establecer un lenguaje común para su estudio. Esto abre la posibilidad de generar sinergias entre diferentes campos y ámbitos de la investigación científica, facilitando la identificación de principios cada vez más generales (Balagué y col., 2017). La búsqueda del mínimo número de principios para explicar el número máximo de fenómenos es un objetivo implícito de la ciencia. De hecho, ésta ha sido precisamente la gran aportación de los más célebres científicos de la historia como Newton (quien unificó fenómenos como la mecánica celeste, las mareas de la Tierra y los cuerpos que caen para crear la ley de la gravitación universal), Maxwell (quien conjuntó fenómenos aparentemente distintos de luz, electricidad y magnetismo en una teoría electromagnética unificada) o Einstein (quien unificó las nociones de espacio, tiempo, materia, energía y gravedad). En la misma línea, el gran anhelo de la física actual es encontrar un marco de unificación teórica de los dos grandes pilares de la física contemporánea: la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad general. Resulta lógico pensar pues que el futuro de la investigación y el entrenamiento deportivo no pasa por la especialización, sino por mejorar la comprensión de las leyes y principios generales que subyacen al comportamiento humano y social.

La perspectiva de los sistemas complejos ya se ha mostrado eficaz para dicho propósito, pues ha sido capaz de investigar y explicar usando unos mismos principios dinámicos campos aparentemente tan dispares como la toma de decisiones (Araújo, Davids y Hristovski, 2006), el estado de flow (Montull y col., 2020), el foco de atención (Slapsinskaite y col., 2017), la percepción de fatiga (Balagué y col., 2014) o la coordinación cardio-respiratoria (García-Retortillo y col., 2019). Las mismas leyes y

principios usados para explicar la fatiga (Balagué y col., 2014) resultan útiles para explicar la emergencia del movimiento tanto a nivel individual (Torrents y col., 2015), como a nivel colectivo (Duarte, Araujo, Correia & Davids, 2012), lo que nos permite reducir los límites entre las disciplinas tradicionales. Así, bajo unas mismas leyes podemos explicar y trabajar el rendimiento con independencia de la modalidad deportiva.

En el ámbito de los sistemas complejos, los constreñimientos juegan un papel fundamental, ya que condicionan la manera en la que los múltiples componentes de un sistema se auto-organizan (Haken, 1987) generando comportamientos macroscópicos (Kugler, Kelso & Turvey, 1980), y son usados en un amplísimo ámbito científico que abarca desde la biología a la lingüística, pasando por las matemáticas, la física o la ciencia de la computación. En ciencias del deporte hemos visto como los constreñimientos juegan un papel fundamental en el aprendizaje de habilidades (Davids, Button y Bennett, 2008; Renshaw, Davids y Savelsbergh, 2010), el desarrollo motriz (Haywood y Getchell, 2014), la medicina (McKeon y Hertel, 2006), la terapia física y la rehabilitación (Holt, Wagenaar y Saltzman, 2010; Newell y Valvano, 1998; Wikstrom, Hubbard-Turner y McKeon, 2013), la preparación física (Holmberg, 2009; Jeffreys, 2011), la biomecánica deportiva (Glazier y Davids, 2009; Seifert y Chollet, 2008), la creatividad (Torrents, Balagué, Ric y Hristovski, 2020) o las lesiones deportivas (Pol y col., 2018).

Debido a la integración de variables estudiadas en estas diferentes disciplinas, la perspectiva de los constreñimientos (constraints-led approach, CLA) ha sido sugerida como un posible modelo para unificar los estudios enfocados al rendimiento deportivo (Glazier, 2017) y por tanto útil a los propósitos marcados en las secciones anteriores. Sin embargo, reconociendo el potencial del CLA, identificamos también algunas de sus limitaciones. Una de ellas es la compresión de los conceptos “tarea” y “constreñimientos de la tarea”, que podían dificultar el entendimiento de los fenómenos deportivos estudiados, así como la transferencia entre los principios teóricos y su aplicación práctica. Es por esto que, en el segundo artículo de la tesis, se propone la redefinición de los constreñimientos de la tarea y de su clasificación. Las modificaciones que realizamos se sustentan sobre la base de cuatro premisas básicas: a) los constreñimientos de la tarea se distribuyen entre la persona y el entorno y, por lo tanto, son variables interrelacionadas, b) siendo interrelacionadas, los constreñimientos de la tarea son también propiedades emergentes del sistema sujeto/entorno, c) los constreñimientos

están anidados en escalas temporales, y d) el conjunto de constreñimientos se encuentra correlacionado a través de la propiedad de causalidad circular.

Esta actualización de la perspectiva de los constreñimientos, junto con principios de evolución biológica y sistemas dinámicos complejos, nos servirá como base de los dos siguientes artículos, en los que se establecen criterios para mejorar la eficacia y eficiencia de las intervenciones técnicas en entornos cada vez más diversos y complejos con el fin de mejorar el rendimiento deportivo y reducir la incidencia lesional.

2.3 Consecuencias en el entrenamiento deportivo y la prevención de lesiones

“No hay nada más práctico que una buena teoría”.

James Clark Maxwell

¿Qué debería hacer un profesional de las ciencias de la actividad física y el deporte si se le presenta el siguiente caso? Una chica de 24 años, que mide 1,65 m, pesa 65 Kg, tiene un índice de masa corporal de 24, y es activa físicamente pero no realiza ningún protocolo específico de entrenamiento, quiere ganar fuerza y masa muscular. Probablemente lo más indicado sea buscar evidencia científica que nos guíe en nuestra intervención. Y en este sentido estamos de suerte, encontramos algunos estudios publicados en la prestigiosa revista insignia del American College of Sports Medicine, la asociación que lidera la prescripción de ejercicio a nivel internacional, publicación de primer cuartil y la segunda más citada en ciencias del deporte. Entre ellos, encontramos un trabajo que contiene una amplia muestra de chicas ($n= 342$) de $23,9 \pm 0,3$ años de edad, con una estatura de $165,2 \text{ cm} \pm 0,4$, un peso de $65 \text{ Kg} \pm 0,7$ y un índice de masa corporal de $23,7 \pm 0,2$ (Hubal y col., 2005). Asimismo, la selección de la muestra se hace siguiendo estrictos criterios de inclusión/exclusión: fueron excluidas todas las participantes que usaran medicamentos que se sabe que afectan el desarrollo muscular, como los corticosteroides; tuvieran alguna restricción para realizar actividad física; condiciones médicas crónicas como diabetes; implantes de metal en brazos, ojos, cabeza, cerebro, cuello o corazón que prohibirían las pruebas de resonancia magnética (necesarias para controlar las modificaciones provocadas por el entrenamiento); hubieran realizado entrenamiento de fuerza o un empleo que requiriera el uso repetido de los brazos en los 12 meses anteriores; consumieran de promedio más de dos bebidas alcohólicas al día; o hubieran usado suplementos dietéticos que pudieran aumentar el tamaño / fuerza de los músculos o provocar aumento de peso, como suplementos de proteínas, creatina o precursores androgénicos. Parece ideal, pues es un estudio metodológicamente bien diseñado, de datos apareados (comparan los efectos en la extremidad no dominante respecto a la dominante, que actúa como control sin realizar ningún tipo de entrenamiento específico), y que valora el impacto del entrenamiento tanto en la fuerza como en la masa muscular en una muestra totalmente representativa para nuestro caso.

El estudio aplica un protocolo de entrenamiento de 12 semanas y valora su impacto en 3 variables: el área de sección transversal (CSA), la máxima contracción voluntaria (MCV) y la fuerza máxima (1RM). Los resultados del estudio nos muestran que, con una $p < 0.001$, el protocolo aplicado aumenta la CSA un 17,9%, la MCV un 22% y la 1RM un 64,1%. Pero ¿Qué significan esos resultados? ¿Qué probabilidad tenemos de obtener unos resultados relativamente similares a estos aplicando el mismo protocolo con nuestra deportista? El estudio de Hubal y col. es un trabajo singular ya que, a diferencia de lo que es habitual, no solo ofrece información sobre el resultado promedio y la desviación estándar, sino que nos ofrece también información sobre qué porcentaje de chicas obtuvo cada uno de los resultados observados en el estudio. Observamos que los resultados promedio no son, ni mucho menos, los más probables de obtener mediante la realización de ese protocolo. Por ejemplo, en los parámetros de fuerza (1RM y MCV) observamos que más del 80% de las chicas obtuvieron resultados significativamente diferentes al promedio. Por ejemplo, en la fuerza máxima tan solo un 16% de las chicas obtuvo un beneficio similar al promedio (resultados comprendidos entre un 58,5 y 72,5 para un promedio del 64,1%), y en cambio algo más de un 20% de ellas obtuvieron mejoras equivalentes o superiores al 100%. De hecho, los efectos del entrenamiento en la 1RM abarcaron desde algunas chicas que no obtuvieron ninguna mejora a otras que obtuvieron mejoras del 250%. Con la MCV se observó que los resultados oscilaron entre un -31,5% y 93,4%, mientras que con la CSA los resultados estuvieron comprendidos entre un -2,3% y un 59,3%. Aunque podríamos ver citado el artículo en cualquier publicación del mundo afirmando que ese protocolo es una herramienta eficaz para mejorar la MCV un 22%, la 1RM un 64% y la CSA un 17,9% ($p < 0.001$), generando una gran sensación de seguridad tanto en técnicos como en deportistas, esos resultados no son los que obtuvieron la mayoría de las participantes, sino resultados promedio alejados, en la mayoría de los casos, de los resultados reales de cada una de las participantes. De hecho, es mucho más probable obtener un resultado significativamente diferente a la media que un resultado parecido, a pesar que la sensación que pueden generar este tipo de estudios es totalmente la contraria.

La comparación de medias grupales es el procedimiento de investigación más común en ciencias del deporte. Los estudios que sometemos al escrutinio de la ciencia para establecer qué intervenciones tienen el respaldo de la evidencia suelen mostrar simplemente la media y la desviación estándar de los resultados obtenidos por los grupos experimentales, con el supuesto de que el promedio grupal representa una

respuesta típica para la mayoría de los individuos (Mann, Lamberts y Lambert, 2014; Pickering y Kiely, 2019). Sin embargo, es común que los deportistas muestren una amplia gama de respuestas a una intervención, desde excepcionalmente importantes a excepcionalmente pequeñas o incluso negativas, en lugar de una respuesta similar, a pesar de que muy raramente se aborde el análisis de dicha variabilidad o se ofrezcan siquiera los resultados individuales de las intervenciones analizadas (Buford, Roberts y Church, 2013; Mann, Lamberts y Lambert, 2014; Pickering y Kiely, 2019).

Incluso estudios bien controlados con muestras y niveles de adherencia homogéneos han demostrado respuestas de entrenamiento significativamente heterogéneas en diversas áreas del entrenamiento. Por ejemplo, 720 sujetos se sometieron a un programa de entrenamiento aeróbico de 20 semanas, completando una batería de pruebas previas y posteriores a la intervención (Bouchard y Rankinen, 2001). Mientras que la mejora media en el consumo máximo de oxígeno ($VO_2\text{max}$) fue de 384 ml de O_2 , algunos sujetos experimentaron mejoras de más de 1000 ml de O_2 (+260% en comparación a la media), y otros una reducción del $VO_2\text{max}$. Diversos estudios y revisiones confirman que esta gran heterogeneidad interindividual en los efectos de un mismo protocolo es un aspecto común en multitud de ámbitos de entrenamiento, como el relacionado con el componente metabólico (Shepard, Rankinen y Bouchard, 2004; Whipple y col., 2017), el entrenamiento orientado a la fuerza (Ahtiainen y col., 2016; Bamman y col., 2007; Churchward-Venne y col., 2015; Erskine y col., 2010; MacDonald, 2010) o el entrenamiento de sprints repetidos (Astorino y Schubert, 2014; Bonafiglia y col., 2016). En aspectos más relacionados con la salud, como puede ser la pérdida de peso (Williamson, Atkinson y Batterham, 2018) o el efecto del ejercicio en la regulación del azúcar en sangre en gente sana, diabética y prediabética (Böhm y col., 2015) la variabilidad de resultados es también muy elevada. La Organización Mundial de la Salud estima que la séptima causa de muerte en el mundo es la diabetes (Organización Mundial de la Salud, 2020), y aunque sabemos que el ejercicio es una de las estrategias clave en su prevención, entre un 7% y un 63% de las personas participantes en los estudios que así lo evidencian, no muestran mejoras significativas (Böhm y col., 2015).

Otro elemento que ilustra la individualidad de la respuesta a un mismo entrenamiento y, por extensión, las diferencias significativas entre participantes en un mismo estudio, lo vemos en aquellos trabajos que analizan la influencia de una misma intervención en múltiples variables. En ellos se observa como un mismo protocolo, no solo provoca que

unos mejoren y otros no (o lo hagan menos) en una determinada variable, sino que algunos sujetos mejoran en unas variables y otros en otras (MacDonald, 2010; Pickering y Kiley, 2019). Por tanto, como sugieren Pickering y Kiley (2019), no es que existan “responders” (personas que mejoran con el entrenamiento) y “non-responders” (personas que no mejoran con el entrenamiento), sino personas que mejoran una determinada variable con un tipo de entrenamiento y personas que, simplemente, necesitan otro tipo de estímulo para obtener resultados similares o que con esos mismos estímulos obtiene unos beneficios distintos.

Esta heterogeneidad, que inutiliza las medias grupales y la universalidad de una sola metodología válida, han sido perfectamente descritos en diferentes ámbitos. La medicina (Worthley y Leggett, 2010), la neurociencia (Mueller y col., 2013), la educación (Kulik, Kulik y Bangert-Drowns, 1990) o la antropometría (Kennedy, 1976) son algunos de ellos. Como hemos visto cuando analizábamos la revisión sistemática de Van Dyk y col. (2019), el efecto del ejercicio excéntrico presentaba también una gran heterogeneidad de resultados, que oscilaban entre un efecto negativo del 21% y un beneficio positivo del 97%. En cambio, no impide esto que en las conclusiones e, incluso en el título del artículo (*Including the Nordic hamstring exercise in injury prevention programmes halves the rate of hamstring injuries: a systematic review and meta-analysis of 8459 athletes*), se dé por bueno el valor promedio de un beneficio positivo del 51%. Paradójicamente, al aumentar el tamaño de la muestra a través de acumular diferentes estudios, como ocurre en las revisiones sistemáticas, no solo no se solventa el problema de la personalización y contextualización, sino que se agrava. Cuanto mayor es el grupo experimental, y cuanto más general es la metodología de investigación (p.e., metanálisis o revisiones sistemáticas) más difícil resulta entender cómo y porqué se produce dicha variabilidad, y cómo y porqué funciona cada intervención en cada deportista (Sturmborg, 2019). En cambio, el título del artículo de VanDyk y col., en el que resaltan la amplísima muestra (8459 atletas) y un claro efecto promedio (reducción de las lesiones a la mitad), ejemplifica notoriamente la tendencia en ciencia de pensar que una mayor muestra es garante de una mayor evidencia sobre qué deberíamos esperar de un tipo de intervención. En este sentido, Todd Rose, director del programa Mente, Cerebro y Educación en la Facultad de Educación de Harvard y director del laboratorio para la Ciencia del Individuo en la misma institución, nos advierte que el uso de los promedios para estimar las características o necesidades de los individuos es “peor que inútil,

porque crea la ilusión de conocimiento, cuando en realidad el promedio oculta lo más importante de un individuo” (Rose, 2016).

A la luz de la evidencia, y aunque el abordaje de heterogeneidad en el ejercicio se viene reclamando desde hace casi 4 décadas (Bouchard, 1983), resulta lógico pensar que uno de los principales desafíos para los científicos del ejercicio en los próximos años será entender y manejar la amplia variabilidad interindividual (Booth y Laye, 2010). Las hipótesis sobre las causas de esta variabilidad van desde la nutrición, al descanso, diferencias genéticas, hormonales, etc. (Mann, Lamberts y Lambert, 2014). Sin embargo, en realidad, las diferencias observadas no hacen sino confirmar propiedades básicas de los sistemas complejos: su alta sensibilidad a las condiciones iniciales, su dependencia del contexto y la no linealidad de su comportamiento.

Si la disparidad de resultados es tal cuando nos focalizamos en el rendimiento puramente cuantitativo ¿Se imagina el lector cuales pueden ser las diferencias entre jugadores y jugadoras respecto a la efectividad del mensaje de un entrenador o entrenadora a la hora de transmitir una estrategia de partido? Siendo coherentes con dichas evidencias, no sería sensato proponer unas intervenciones concretas promulgando, implícita o explícitamente, la universalidad de su utilidad. Por tanto, el tercer y cuarto artículo de la tesis, que tienen una orientación más práctica, se centran en el desarrollo de criterios metodológicos que permitan analizar y comprender qué tipo de intervención puede ser más adecuada para cada contexto.

Esta interpretación sobre cómo abordar la parte práctica resulta disruptiva. Prueba de ello son las continuas reclamaciones de los revisores de aplicaciones prácticas más concretas. O lo que es lo mismo, “*cosas que puedes hacer en cualquier circunstancia y, a priori, van a funcionar*”. Esta continua búsqueda de “recetas universales” ha llevado a simplificar y despreciar casi por completo el pensamiento crítico de los profesionales de las ciencias del deporte, siendo cada vez más común la reclamación de aplicar protocolos estandarizados para problemáticas estandarizadas. Por ejemplo, en el British Journal of Sports Medicine (una de las revista con mayor factor de impacto en ciencias del deporte), Bahr, Thorborg y Ekstrand (2015) analizaban si 50 clubes de Champions League (UCL) y de la primera división de Noruega seguían el protocolo de NH propuesto en otros estudios (Arnason y col., 2007; Mjølshnes y col., 2004; Petersen, Thorborg y Nielsen, 2011). A pesar que la mayoría de los equipos realizó durante la temporada, de

forma más o menos frecuente, el NH, los autores afirman que *“La gran mayoría de los equipos no utilizaron el programa Nordic Hamstring según lo prescrito. ¿Por qué los equipos no adoptan e implementan un programa de ejercicios con un efecto bien documentado en el riesgo de lesiones? Esto es muy difícil de explicar... Por lo tanto, como cuatro de cada cinco equipos no cumplieron con el protocolo, no sorprende que las tasas de lesiones en los “isquios” sigan siendo altas en UCL y el fútbol de élite noruego... En conclusión, la adopción e implementación del programa específico de ejercicios NH en los niveles más altos de fútbol masculino en Europa es baja; demasiado bajo para esperar un efecto general en las tasas de lesiones agudas de los “isquios”*”. En pocas palabras, lo que dicen los autores es que los aproximadamente 1250 jugadores que participaron en el estudio (estimando unos 25 por equipo), sean cuales sean sus características y circunstancias particulares, se lesionan porque, aunque hagan con frecuencia el NH, no lo hacen exactamente con el número de repeticiones, series y frecuencia semanal que marca el protocolo estándar. Éste es un ejemplo claro del pensamiento universalista y descontextualizado, que ilustra el enfoque mecanicista dominante en ciencias del deporte. El enfoque que, como hemos visto hasta ahora, nos ha llevado a incurrir y recurrir en falacias y supuestos infundados.

A través del tercer y cuarto artículo de la tesis se pretende facilitar, a partir de la sistematización de principios teóricos y metodológicos basados en los sistemas complejos y las teorías de la evolución biológica, una mejor comprensión de las propiedades de los sistemas con los que trabajamos y del proceso de entrenamiento deportivo. Las propuestas prácticas que emergen de los nuevos supuestos no solo significan una forma diferente de entrenar, sino que suponen una reorganización global de las cuestiones básicas a las que pretende responder el entrenamiento. El enfoque clásico de aprender una habilidad y mejorar el estado de forma es reemplazado por el de aumentar el potencial de diversidad / imprevisibilidad de los equipos / atletas a través del desarrollo de sinergias. El desarrollo de dichas capacidades se basa en la organización jerárquica y la causalidad circular de los constreñimientos propuesta en el segundo artículo de la tesis. La toma de consciencia de esta causalidad circular es una herramienta importante para mejorar la eficiencia de las intervenciones en entrenamiento, y permite al profesional simplificar sus intervenciones manipulando constreñimientos más estables temporalmente. Comprender cómo los valores personales de un jugador constriñen su fisiología, o como el estilo de juego colectivo constriñe la frecuencia cardíaca y el metabolismo energético, permite desarrollar estrategias de entrenamiento

que integran factores sociales, psicológicos, fisiológicos, etc. de forma correlacionada permitiendo aumentar la eficacia y eficiencia del proceso.

El objetivo de desarrollar el potencial de diversidad / imprevisibilidad de los equipos y deportistas implica un cambio también en el rol del entrenador. Éste pasa de ser el encargado de predefinir las respuestas óptimas de los deportistas y encargarse de que las aprendan o alcancen, a ser el encargado de manejar y modificar los entornos de aprendizaje para aumentar su potencial de diversidad. Para los deportes de equipo se plantea un cambio en la unidad básica de entrenamiento, pasando a ser el equipo y no el jugador el sistema de referencia. Este nuevo sistema de referencia (el equipo) será entrenado y analizado a través de los mismos principios que nos guían en el análisis y entrenamiento de los deportistas individuales, de manera que se hacen converger dos líneas de estudio y trabajo tradicionalmente separadas: los deportes individuales y los deportes colectivos. Esta comprensión elegante y sintética del funcionamiento del deporte y los deportistas no entiende de fronteras entre disciplinas deportivas, edades o niveles de rendimiento, de manera que sus aplicaciones son extensibles a cualquier tipo de entrenamiento o circunstancia.

El nuevo planteamiento supone también un cambio en el clásico enfoque dicotómico rendimiento/prevenición. Como hemos visto en las páginas anteriores, el simplista modelo que defiende que un músculo más fuerte se lesiona menos ha constreñido enormemente la práctica e investigación deportiva. Una de las consecuencias más importantes derivadas de esa visión es la división entre entrenamiento preventivo y entrenamiento orientado a la mejora del rendimiento. Mediante los mismos principios que analizan cómo podemos incrementar el rendimiento, podemos estudiar cómo se incrementa o disminuye la susceptibilidad de lesión en los deportistas. Este enfoque nos permite modificar los postulados clásicos en la prevención de lesiones provocando una inevitable fusión de objetivos con el rendimiento.

Un ejemplo claro de este cambio de paradigma lo tenemos en los mecanismos de lesión. Uno de los temas más controvertidos es el debate sobre qué fase de la carrera de alta velocidad está más asociada con lesiones en los “isquios”, siendo la fase final del balanceo o la fase inicial de la impulsión los principales candidatos (Yu Liu y col., 2017). Sin embargo, analizando los datos proporcionados por los sensores de movimiento (popularmente conocidos como GPS, a pesar de ser una nomenclatura equivocada, pues

por lo general incorporan también otro tipo de sensores), se observa que ese teórico mecanismo de lesión se ha producido millones de veces (solo teniendo en cuenta los entrenamientos) sin provocar lesión observable (datos propios sin publicar). Esta normalidad se rompe cuando, de forma súbita, una repetición sin excepcionalidad mecánica, provoca una lesión a nivel macroscópico. Esta es una conclusión a la que puede llegar cualquier aficionado al deporte que haga memoria visual de una lesión no traumática de un deportista. Cuando un futbolista se lesiona el “isquio” en un sprint, es imposible apreciar ninguna diferencia con cualquiera de los sprints que partido tras partido había realizado ese jugador sin ningún tipo de consecuencia aparente. Incluso en ese mismo sprint en el que se produce la lesión, el deportista apoya antes numerosas veces esa pierna en unas condiciones casi idénticas a las del momento de la lesión sin que suceda nada observable, hasta que aparentemente de forma súbita se desencadena una lesión. Por esto, proponemos cambiar los parámetros estáticos asociados a factores de riesgo por constreñimientos dinámicos que alteran la susceptibilidad de lesión, y que tienen que ver con todas las dimensiones de la persona, y no exclusivamente con su biomecánica, con determinados parámetros de rendimiento o con el tipo de ejercitación. Se vuelve necesario pues valorar en cada intervención qué repercusión potencial tiene sobre esa susceptibilidad, en lugar de intervenir simplemente prescribiendo (por ejemplo) 3 series de 10 repeticiones de un determinado ejercicio (como el NH), asumiendo que dichas series actúan de forma preventiva. En realidad, el mismo ejercicio excéntrico, que bajo determinadas condiciones puede reforzar las estructuras miotendinosas, en un contexto distinto puede desencadenar una macrolesión. No se trata pues de que el profesional prescriba ejercicios preventivos, sino de que tenga una mejor comprensión del fenómeno lesional.

Por esta razón, el cuarto de los artículos explica de forma específica cómo los constreñimientos, substituyendo el clásico concepto de factor de riesgo, y actuando a diferentes niveles y escalas temporales, pueden modificar la susceptibilidad de lesión del sistema músculo esquelético. Proponemos la hipótesis de la conectividad y el mecanismo de percolación para explicar cómo se desencadenan las lesiones deportivas. La acumulación de micro-lesiones modifica la adaptabilidad y susceptibilidad del sistema músculo-esquelético a nuevas perturbaciones provocadas por el ejercicio, de manera que, a través de efectos no lineales, una pequeña perturbación, como la tensión excéntrica producida por el apoyo durante una carrera, puede derivar en determinados contextos en la aparición de una lesión observable a escala macroscópica. Esto plantea

nuevos retos para el entrenamiento y para la ciencia, pues pone de relevancia nuevas variables de estudio, relacionadas con la conectividad de microlesiones, y abre la posibilidad de detectar regiones críticas de los constreñimientos que producen inestabilidad en el sistema músculo-esquelético. El foco pues de la prevención no está en el entrenamiento preventivo, sino en la adecuada gestión de los constreñimientos, que en contextos cambiantes modifican la susceptibilidad del deportista a lesionarse.

3.0 Artículos publicados

3.1 ¿Ciencia o pseudociencia de la actividad física y el deporte?

Science or Pseudoscience of Physical Activity and Sport?

Natàlia Balagué^{1*}, Rafel Pol² and Isaac Guerrero³

¹Complex Systems and Sport Research Group, National Institute of Physical Education of Catalonia (INEFC), University of Barcelona (UB), Barcelona, Spain, ²Complex Systems and Sport Research Group, National Institute of Physical Education of Catalonia (INEFC), University of Lleida (UdL), Lleida, Spain, Royal Spanish Football Federation, Spain, ³Knowledge Area, FC Barcelona, Barcelona, Spain

Abstract

The prevalence of pseudo-scientific ideas and “neuromyths” among coaches, coupled with the need to improve the contents of their education programmes, has recently been highlighted in the scientific literature. In this opinion paper, we identify and discuss some common beliefs, prejudices and tacit assumptions in the field of sport sciences that can favour the presence of pseudoscience in education and professional practice, such as: (a) sport is too complex a phenomenon to be studied scientifically, (b) sport needs applied science, (c) in sport, practice and experience are more important than theory; (d) all theories are partly true and equally acceptable; and (e) there are “hard sciences” (biological) and “soft sciences” (social). In relation to the arguments outlined, several intervention recommendations are shared for the institutions and organisms in charge of training sport science professionals.

Keywords: basic science, scientific theory, pseudoscience, beliefs, education

Introduction

It would be unthinkable for training or professional practice in medicine, engineering or biology not to be based on scientific evidence. In contrast, although it seems paradoxical, it is quite common to find theoretical and practical contents that are not evidence-based in training programmes in the physical activity and sport sciences (PASS) and in the exercise of the profession. It is quite a widespread situation which can be found in both the university (Master’s and Bachelor’s degrees) and at other levels of education (vocational training, technical courses, etc.), as revealed

* Correspondence:
Natàlia Balagué (nataliabalague@gmail.com).

¿Ciencia o pseudociencia de la actividad física y el deporte?

Natàlia Balagué^{1*}, Rafel Pol² e Isaac Guerrero³

¹Grupo de Investigación de Sistemas Complejos y Deporte, Instituto Nacional de Educación Física de Cataluña (INEFC), Universidad de Barcelona (UB), Barcelona, España, ²Grupo de Investigación de Sistemas Complejos y Deporte, Instituto Nacional de Educación Física de Cataluña (INEFC), Universidad de Lleida (UdL), Lleida, España, Real Federación Española de Fútbol, España, ³Knowledge Area, FC Barcelona, Barcelona, España

Resumen

La prevalencia de ideas pseudocientíficas y “neuromitos” entre las entrenadoras y entrenadores, así como la necesidad de mejorar los contenidos de sus programas de formación, se ha puesto recientemente de relieve en la literatura científica. En este artículo de opinión se identifican y discuten algunas creencias, prejuicios y supuestos tácitos comunes en el ámbito de las ciencias de la actividad física y el deporte que pueden favorecer la presencia de pseudociencia en la formación y la práctica profesional, como son: (a) el deporte es un fenómeno demasiado complejo para ser estudiado científicamente; (b) el deporte necesita ciencia aplicada; (c) en el deporte, la práctica y la experiencia son más importantes que la teoría; (d) todas las teorías tienen parte de verdad y son igualmente aceptables; (e) hay “hard sciences” (biológicas) y “soft sciences” (sociales). En relación con los argumentos que se exponen, se recomiendan algunas intervenciones dirigidas a las instituciones y organismos responsables de la formación de profesionales de la actividad física y el deporte.

Palabras clave: ciencia básica, teoría científica, pseudociencia, creencias, formación

Introducción

Sería impensable que la formación o la práctica profesional en medicina, ingeniería o biología no se basara en evidencias científicas. En cambio, aunque resulte paradójico, es muy común encontrar contenidos teóricos y prácticos no basados en evidencias en los programas de formación en ciencias de la actividad física y el deporte (CAFD) y también en el ejercicio de la profesión. Es una realidad muy extendida, que se manifiesta tanto a nivel universitario (másters, grados) como en otros niveles de formación (ciclos formativos, cursos de técnicos, etc.), tal como se constata en una publicación reciente

* Correspondencia:
Natàlia Balagué (nataliabalague@gmail.com).

in a recent publication on the prevalence of pseudoscientific professional ideas and practices based on “neuromyths” among trainers in the United Kingdom, a country regarded as on the cutting edge in sport sciences (Bailey, Madigan, Cope, & Nicholls, 2018). The authors point to different reasons to explain this irregular and worrisome phenomenon: the recent advent of sport sciences, the different levels of academic training of students and teachers, the quality of the information sources checked and the lack of judgement when discriminating what is and is not quality science. With the goal of improving the effectiveness of professional practice and lowering the risks of poor practice, which affects not only the athletes but also the population at large, the authors suggest rectifying this situation by focusing on the contents of the training programmes.

The objective of this opinion article is twofold: 1) to help raise the awareness of the people in charge of PASS training, students and professionals of the need to control the quality of the scientific contents in training programmes; and 2) to propose specific interventions aimed at promoting a professional practice based on up-to-date scientific evidence.

First, we shall identify and discuss some unfounded beliefs, prejudices and tacit assumptions which foster the prevalence of what could be considered pseudoscience in the training and practice of sport professionals, and then we will propose several intervention strategies.

Science and Pseudoscience

The increase in the number of scientific and unscientific contributions related to the sport sciences, and the possibilities of immediately accessing them, has been spectacular in the past few decades. This has led to a significant yet also rather anarchic revolution in professional practice, reflecting a critical shortcoming when discriminating between what is and is not science, and what is good and bad science (or pseudoscience), or even what is “ugly” science (Bailey, 2017).

Science is a dynamic process; theories that work survive, while those that cannot be corroborated with facts, or those that do not provide valid explanations, die. That is, hypotheses which are not compatible with reality (data) are rejected, and the theories are replaced with others which better fit this reality. Whatever does not follow this process is not science. It should be

sobre la prevalencia de ideas y prácticas profesionales pseudocientíficas y basadas en “neuromitos” entre las entrenadoras y los entrenadores en el Reino Unido, país considerado abanderado en ciencias del deporte (Bailey, Madigan, Cope y Nicholls, 2018). Las autorías apuntan diferentes razones para explicar este irregular y preocupante fenómeno: la juventud de las ciencias del deporte, los diferentes niveles de formación académica del alumnado y profesorado, la calidad de las fuentes de información consultadas o la falta de criterio a la hora de discriminar entre la calidad de las ciencias. Con el propósito de mejorar la efectividad de la práctica profesional y reducir los riesgos de una mala praxis, que afectan no solo a deportistas sino también a la población en general, las autorías proponen corregir la situación incidiendo sobre los contenidos de los programas de formación.

El objetivo de este artículo de opinión es doble: 1) ayudar a concienciar a los agentes responsables de la formación en CAFD, al alumnado y a los profesionales sobre la necesidad de controlar la calidad de los contenidos científicos de los programas de formación, y, 2) proponer intervenciones concretas dirigidas a promover una práctica profesional basada en evidencias científicas actualizadas.

En primer lugar se identificarán y se discutirán algunas creencias, prejuicios y supuestos tácitos infundados que favorecen la prevalencia de lo que se podría considerar pseudociencia en la formación y praxis de las y los profesionales del deporte, y finalmente se propondrán algunas estrategias de intervención.

Ciencia y pseudociencia

El aumento de la cantidad de contribuciones científicas y también no científicas relacionadas con las ciencias del deporte, y las posibilidades a su acceso inmediato, ha sido espectacular en las últimas décadas, lo que ha hecho evolucionar la praxis profesional de una forma importante pero también bastante anárquica, reflejando una falta de criterio a la hora de discriminar qué es y qué no es ciencia, qué es buena y mala ciencia (o pseudociencia), o incluso, qué es ciencia “fea” (Bailey, 2017).

La ciencia es un proceso dinámico; las teorías que funcionan sobreviven, mientras que aquellas que no pueden ser corroboradas con hechos, o que no los explican suficientemente bien, mueren. Es decir, se rechazan las hipótesis que no son compatibles con la realidad (datos) y las viejas teorías son sustituidas por otras que se ajustan mejor. Todo lo que no se adecúa a este proceso

stressed that science (and the science of sport) advances not only by changing theories but also, and more importantly, by changing the way we think about the problems/phenomena around us and the way questions are asked.

The kind of science that misuses the scientific process or interprets the results improperly is described as “bad science” or “pseudoscience”. There is also science that, while perhaps not “bad”, tries to push mercantile interests; this is “ugly” science. Ideas, intuitions, experience or opinions, which are quite frequent in the field of sport, are not good or bad science; they simply are not science. Ideas must be properly checked against existing knowledge and proven in order to be accepted or rejected. Since science is not static, people who work in it must always be willing to change their understanding of phenomena when faced with new evidence or valid arguments. Resisting changes owing to personal interests or other reasons is tantamount to bad science.

In order to ensure that the scientific process is properly used, publications monitor for conflicts of interest and engage in “peer reviews” by experts who confirm the quality of the scientific studies. Prestigious publications follow a rigorous review process which seeks to guarantee that what is published is endorsed by the international scientific community. Not all have the same level of rigour, and this is why it is important to refer to the most qualified ones within each of the fields of knowledge when conducting literature searches. Currently the impact factor, immediacy index and quartile of scientific journals; the article citation index; and the h-index of authors are valued as indicators of quality. The quality of books is judged by the prestige of the publisher, the number of citations, the number of databases that index it, the reviews and translations (Web of Science, 2018). However, critical assessments of these indicators and the way they can be misused (Sparkes & Smith, 2014) require additional contextualised assessment which allows the publication’s real scientific and social impact to be confirmed.

Beliefs and Prejudices About Science

Below we shall discuss some common beliefs, prejudices and tacit assumptions which hinder professional teaching and practice based on up-to-date scientific evidence in physical activity and sport:

no es ciencia. Hay que puntualizar que la ciencia (y la ciencia del deporte) no avanza solo cambiando teorías sino sobre todo cambiando la forma de pensar sobre los problemas/fenómenos que nos rodean y la formulación de las preguntas.

Se califica de “mala ciencia” o “pseudociencia” la que usa mal el proceso científico, o interpreta los resultados de forma inadecuada. También hay ciencia que sin ser “mala” intenta favorecer intereses mercantiles, es la ciencia “fea”. Las ideas, intuiciones, la experiencia o las opiniones, muy frecuentes en el ámbito del deporte, no representan ciencia buena o mala, simplemente no son ciencia. Las ideas deben contrastarse adecuadamente con el conocimiento existente y se prueben para ser aceptadas o rechazadas. Como la ciencia no es estática, las personas que se dedican a ella tienen que estar siempre dispuestas a cambiar su comprensión de los fenómenos ante nuevas evidencias o argumentos válidos. Resistirse al cambio por intereses personales u otros motivos es llevar a cabo mala ciencia.

Para garantizar el buen uso del proceso científico, las publicaciones controlan los conflictos de intereses y activan las “revisiones por pares”, o revisiones por parte de personas expertas que avalan la calidad de los trabajos científicos. Las publicaciones de reconocido prestigio siguen un riguroso proceso de revisión, que pretende garantizar que lo que se publica sea avalado por la comunidad científica internacional. No todas tienen el mismo nivel de exigencia, y por este motivo es importante dirigirse a las mejor cualificadas dentro de cada uno de los ámbitos de conocimiento cuando se hacen búsquedas de la literatura. Actualmente, se valoran como indicadores de calidad el factor de impacto, el índice de inmediatez y el cuartil de las revistas científicas; el índice de citas de los artículos; y el índice H de las autorías. La calidad de los libros se valora por el prestigio de la editorial, el número de citas, las bases de datos que los indexan, las reseñas y las traducciones (Web of Science, 2018). Así mismo, la valoración crítica de estos indicadores y su mal uso (Sparkes y Smith, 2014), requiere de una valoración adicional adecuadamente contextualizada que permita certificar el impacto científico y social real de la publicación.

Creencias y prejuicios sobre la ciencia

A continuación se discute sobre algunas creencias, prejuicios y supuestos tácitos comunes que dificultan una docencia y práctica profesional en la actividad física y el deporte basada en evidencias científicas actualizadas:

a) *Sport is too complex a phenomenon to be studied scientifically.* This widespread belief may be the product of the characteristics of the type of science that has traditionally been associated with sport. A recent study on PASS research conducted in conjunction with the European College of Sport Sciences stressed some of its main features (Hristovski, Aceski, Balagué, Seifert, Tufekcievski, & Aguirre, 2017): 1) the lack of inter- and cross-disciplinary research; 2) the dominant role of the more classical biological science; and 3) the hegemony of experimental methodologies, which use inferential statistics to seek cause-effect and top-down relations, that is, from the microscopic to the macroscopic. The innovations in the past two decades have not affected the thematic skeleton, which has remained stable, reproducing the dominant model. This situation contrasts with the recent revolution that both the biological and social sciences have experienced via complex dynamic models, which were initially rejected and are now on the cutting edge of science (Karsenti, 2008). The resistance to adopting these dynamic models, inspired by physics and mathematics, in medicine and psychology, sciences which have traditionally been associated with sport, is notably slowing down their penetration into PASS, yet they nonetheless hold a promising future in addressing the multidimensionality and complexity of the phenomenon of sport.

b) *Sport needs applied science.* There is a belief and a tacit assumption, related to the objectives and orientation of science, that undervalue the role of science in sport and sport in science. The belief, based on out-of-date reductionism (Anderson, 1972), is that only physics and biochemistry (and/or biology) are the basic sport sciences, that is, those that are concerned with researching the fundamental laws. This belief ignores the fact that the fundamental laws of physics and chemistry cannot explain phenomena which occur on a macroscopic level in sport, such as decision-making. Despite the fact that this entails electrochemical processes on the level of neural synapses and certain brain structures and functions, neither these processes nor these functions can explain it. New properties emerge at each level which are governed by new fundamental laws. Therefore, there is basic science (theoretical and experimental) and applied science associated with each PASS disciple (biochemistry, psychology, sociology, etc.), and basic science is indispensable in the evolution of applied science. Just to cite an example, the coordination model of Haken, Kelso, and Bunz

a) *El deporte es un fenómeno demasiado complejo para ser estudiado científicamente.* Esta extendida creencia puede ser producto de las características del tipo de ciencia que tradicionalmente se han asociado con el deporte. Un estudio reciente sobre la investigación en CAFD realizado en colaboración con el European College of Sport Sciences ha resaltado algunos de sus rasgos principales (Hristovski, Aceski, Balagué, Seifert, Tufekcievski y Aguirre, 2017): 1) la falta de investigación inter- y transdisciplinaria; 2) el papel dominante de la ciencia biológica más clásica, y 3) la hegemonía de las metodologías experimentales, que apoyándose en la estadística inferencial, buscan relaciones de causa-efecto y de abajo arriba, es decir, del nivel micro al macroscópico. Las eventuales innovaciones producidas durante las dos últimas décadas no han afectado al esqueleto temático, que se ha mantenido estable reproduciendo el modelo dominante. Esta situación contrasta con la reciente revolución que las ciencias biológicas, y también sociales, han experimentado de la mano de modelos dinámicos complejos, inicialmente rechazados y ahora en la vanguardia de la ciencia (Karsenti, 2008). Las resistencias con las que estos modelos dinámicos, inspirados en la física y las matemáticas, son adoptados por la medicina y la psicología, ciencias tradicionalmente vinculadas al deporte, moderan notablemente su penetración en las CAFD, y, aun así, representan una prometedora apuesta de futuro por el abordaje de la multidimensionalidad y complejidad del fenómeno deportivo.

b) *El deporte necesita ciencia aplicada.* Hay una creencia y un supuesto tácito, relacionados con los objetivos y la orientación de la ciencia, que infravaloran el rol de la ciencia en el deporte y del deporte en la ciencia. La creencia, basada en un reduccionismo desfasado (Anderson, 1972), es que las ciencias básicas del deporte, es decir, aquellas que se ocupan de investigar las leyes fundamentales, son solo la física y la bioquímica (y/o la biología). Esta creencia ignora que las leyes fundamentales de la física y la química no permiten explicar fenómenos que se dan a nivel macroscópico en el deporte como la toma de decisiones. Aunque este hecho conlleve procesos electroquímicos a nivel de sinapsis neuronales, y determinadas estructuras y funciones cerebrales, ni estos procesos ni estas funciones pueden explicarla. A cada nivel emergen nuevas propiedades que están regidas por nuevas leyes fundamentales. Por lo tanto, hay ciencia básica (teórica y experimental) y aplicada asociada a cada disciplina de las CAFD (bioquímica, psicología, sociología, etc.) y la ciencia básica resulta indispensable para la evolución de la ciencia aplicada. Para

(1985), the outcome of basic research which revolutionised neuroscience, has given rise to new research applied to sport (Davids, Hristovski, Araújo, Balagué, Button, & Passos, 2014). Likewise, basic experimental research is what has allowed new theories to be introduced to explain important phenomena in sport, such as the psychobiology of fatigue (Venhorst, Micklewright, & Noakes, 2018) and decision-making (Araújo, Davids, & Hristovski, 2006), inspiring new applied research and the creation of alternative working methodologies.

The tacit assumption which we mentioned is that a phenomenon like sport is not useful for engaging in basic science. Quite the contrary, sport is a bank of experimentation on individual and social behaviour that makes it possible to study and model the effect of intense and even extreme disturbances on many levels (psychological, physiological, sociological). The possibility of immediately testing new models with real data is an advantage and a challenge of particular interest to science in general.

c) *In sport, practice and experience are more important than theory.* First, we should clarify that the term theory has a different meaning in everyday parlance and science. In everyday parlance, it is equivalent to an opinion, hypothesis or conjecture (“I have a theory that...”), and this misunderstanding often leads theory and practice to be viewed as opposed to each other. In science, theory refers to a corpus of empirically verified knowledge that has been inductively or deductively proven through and through. Practice, however, provides extraordinarily rich yet subjective, not scientific, knowledge which hinders generalisation and the formulation of theories. Neither anecdotes nor practical testimonials can replace systematic evidence. At the same time, by changing the cognition of the person practising it or working in the profession, theoretical scientific knowledge also changes their lived experience. That is, theory and practice are two indissociable realities which do (or should) go hand in hand in both science and in professional practice.

Any new theory tends to be criticised by more conservative quarters because of its lack of practical applications. Obviously, the applications of a new theory develop over time and cannot be compared to the applications of older theories; today, does anyone dare to question whether quantum physics is practical? In fact, gaining a better theoretical understanding of

poner un ejemplo, el modelo de coordinación de Haken, Kelso, Bunz (1985), fruto de una investigación básica que revolucionó la neurociencia, ha dado lugar a una nueva investigación aplicada al deporte (Davids, Hristovski, Araújo, Balagué, Button y Passos, 2014). Por otra parte, la investigación básica experimental es la que ha permitido introducir nuevas teorías para explicar fenómenos relevantes en el deporte como la psicobiología de la fatiga (Venhorst, Micklewright y Noakes, 2018) o la toma de decisiones (Araújo, Davids y Hristovski, 2006), inspirando nueva investigación aplicada y la creación de metodologías de trabajo alternativas.

El supuesto tácito a que nos referíamos es el de asumir que un fenómeno como el deporte no sirve para realizar ciencia básica. Todo lo contrario, el deporte representa un banco de experimentación del comportamiento individual y social que posibilita estudiar y modelar el efecto de perturbaciones intensas, incluso extremas, a muchos niveles (psicológico, fisiológico, sociológico). Las posibilidades de probar nuevos modelos con datos de la realidad de forma muy rápida suponen una ventaja y un reto de especial interés para la ciencia en general.

c) *En el deporte, la práctica y la experiencia son más importantes que la teoría.* En primer lugar, se debe aclarar que el término *teoría* tiene un significado diferente en el lenguaje común y en ciencia. En el lenguaje común equivale a opinión, hipótesis o conjetura (“tengo la teoría de que...”) y este equívoco lleva a menudo a contraponer teoría y práctica. En ciencia, teoría se refiere a un corpus de conocimiento verificado empíricamente, a hipótesis inductiva o deductivamente contrastada del derecho y del revés. La práctica, en cambio, proporciona un conocimiento riquísimo pero subjetivo, no científico, que impide la generalización y la formulación de teorías. Ni las anécdotas ni los testigos prácticos pueden sustituir las evidencias sistemáticas. Al mismo tiempo, el conocimiento científico teórico, cambiando la cognición de quien practica o de quien ejerce la profesión, cambia también su experiencia vivida. Es decir, teoría y práctica son dos realidades indisolubles, que van juntas (o tendrían que ir) tanto en la ciencia como en el ejercicio profesional.

Cualquier nueva teoría suele ser criticada por parte de los sectores más inmovilistas por su falta de aplicaciones prácticas. Evidentemente, las aplicaciones de una nueva teoría se desarrollan con el tiempo y no se pueden comparar con las aplicaciones de teorías más antiguas; ¿alguien se atrevería a cuestionar si la física cuántica es práctica? De hecho, comprender teóricamente mejor un problema ya supone una gran ventaja en la práctica; como decían

a problem is a huge advantage in practice; as the recognized scientists J. C. Maxwell and K. Lewin said, “there is nothing more practical than a good theory”.

d) *All theories are partly true and equally acceptable*. This belief allows there to simultaneously exist theories in PASS which are grounded upon mutually incompatible assumptions, and this is reflected in the methodological proposals of professionals who mix contradictory underpinnings. Scientific theories are models of reality that evolve by changing their postulates, adding new ones or replacing them with others that better explain and predict this reality. For this reason, it is essential for students to be aware of the historical evolution of scientific theories and to be informed of the most recent theories in relation to sport-related phenomena. Some of the theoretical models that are used in sports training, such as ones that delimit the dimensions of performance (technique, tactic, physical condition, psychological, etc.) or conditional capacities (strength, speed, endurance, etc.) seem untouchable. It should be understood that models are only maps of reality, and that the dimensions and delimitations they propose are artificially constructed barriers. Given these beliefs, instead of misusing ad-hoc explanations or ambiguous language to protect obsolete models, it is far better to open oneself to new models and theories which provide ever-better explanations of reality.

e) *There are “hard sciences” (biological) and “soft sciences” (social)*. The scientific superiority of the biological sciences over the social sciences is an unfounded, widespread prejudice that is prevalent in both PASS and science in general. It is often believed that science can only be conducted in laboratories equipped with precision measuring instruments and through reproducible, controlled experiments. However, science is not characterised by these stereotypes but by checking the data from reality with theories. Therefore, the main problem to be resolved by science, be it chemistry or psychology, is finding appropriate ways of measuring assessing, that is, ways of operationalising concepts. Since it is more difficult to operationalise concepts related to human or social behaviour than to the behaviour of *in vitro* muscle fibre (Diamond, 1987), a prestigious and unusual biologist with experience in both the biological and social sciences suggests labelling the social sciences as “difficult”, since they are the ones that are more difficult to operationalise. What is more, it should be borne in mind that the social sciences are concerned with issues that have a potentially

los reconocidos científicos J. C. Maxwell i K. Lewin, “no hay nada más práctico que una buena teoría”.

d) *Todas las teorías tienen parte de verdad y son igualmente aceptables*. Esta creencia favorece que en las CAFD coexistan a veces teorías que parten de supuestos incompatibles entre sí, y que eso se refleje en las propuestas metodológicas de las y los profesionales, que mezclan fundamentos contradictorios. Las teorías científicas son modelos de la realidad que evolucionan, bien cambiando sus postulados, añadiendo nuevos o siendo sustituidos por otros que explican y predicen mejor esta realidad. Por eso, resulta clave que el alumnado conozca la evolución histórica de las teorías científicas y esté al día de las más recientes en relación con fenómenos relacionados con el deporte. Algunos de los modelos teóricos que se utilizan en el entrenamiento deportivo, como el que delimita las dimensiones del rendimiento (técnica, táctica, condición física, psicológica, etc.) o las capacidades condicionales (fuerza, velocidad, resistencia, etc.) parecen intocables. Debe comprenderse que los modelos son solo mapas de la realidad, y que las dimensiones y delimitaciones que proponen son barreras artificialmente construidas. Ante estas creencias, en vez de abusar de explicaciones *ad hoc* o de un lenguaje ambiguo para proteger modelos desfasados, hay que abrirse a nuevos modelos y teorías que expliquen cada vez mejor la realidad.

e) *Hay “hard sciences” (biológico) y “soft sciences” (social)*. La superioridad científica de las ciencias biológicas sobre las sociales es un infundado y generalizado prejuicio prevalente tanto en el ámbito de las CAFD como en la ciencia en general. A menudo se cree que la ciencia solo se puede llevar a cabo en laboratorios equipados con instrumentos de medida precisos y a través de experimentos reproducibles y controlados. Pero la ciencia no se caracteriza por estos estereotipos sino por contrastar los datos de la realidad con las teorías. Por lo tanto, el principal problema que tiene que resolver esta, sea la química o la psicología, es el de encontrar formas de medida adecuadas de las teorías, es decir, formas de operativizar los conceptos. Como resulta más difícil operativizar conceptos relacionados con el comportamiento humano o social que con el comportamiento de la fibra muscular *in vitro* (Diamond, 1987), un prestigioso y atípico biólogo, con experiencia en investigación tanto en ciencias biológicas como sociales, sugiere etiquetar de “difíciles” las ciencias sociales, pues son las que se enfrentan a dificultades mayores para su operacionalización. Además, hay que tener en cuenta que las ciencias sociales se ocupan de temas que tienen un impacto potencialmente más importante sobre el

more important impact on the future of sport (decisions on sport policy) than the biological sciences.

People's increasing familiarity with the issues researched by the social sciences compared to the biological sciences allow them to regularly spout opinions on the former that are not based on scientific knowledge. This means that research in these fields is undervalued and pseudoscience is promoted. A similar phenomenon occurs in sport, about which generalised opinions are often espoused without scientific rigour being required. Would anyone dare, for example, to express an opinion about genomics or nanotechnology without scientific criteria? We must become aware that the prevalence of beliefs and prejudices based more on ignorance or pseudoscience than on good science negatively affects the quality of training programmes and the effectiveness of professional practice.

Intervention Proposals

Below are several intervention recommendations targeted at institutions and bodies in charge of training in the field of physical activity and sport to promote a professional practice based on proven, up-to-date scientific evidence.

- Review the quality of the teaching materials in training programmes based on indicators of scientific quality.
- Avoid providing practical recipes without associating them with up-to-date scientific theories.
- Introduce the development of scientific theories from a historical perspective in order to promote students' acquisition of critical thinking.
- Help students distinguish science from pseudoscience (Lilienfeld, Ammirati, & David, 2012) and use quality indexes to choose publications.
- Promote minds that are open to new models and scientific theories.
- Nurture PASS training on the advances that are on the cutting edge of science, and do not limit it to the traditional hegemonic knowledge from the scientific disciplines.
- Develop practical-scientific professional profiles and encourage interdisciplinary cooperation.
- Value both basic and applied research in the development of PASS, and value sport as a phenomenon from which fundamental laws can be drawn for science in general.

futuro del deporte (las decisiones sobre la política deportiva) que las ciencias biológicas.

Una familiarización creciente de la población con los temas investigados por las ciencias sociales con respecto a las biológicas permite que se emitan de forma habitual opiniones sobre las primeras no basadas en conocimiento científico, lo que provoca que se infravalore la investigación en esta área y se promueva la pseudociencia. Un fenómeno similar sucede en el deporte, sobre el que se opina de forma generalizada sin que el rigor científico sea un requerimiento. ¿Alguien se atrevería, por ejemplo, a opinar sobre genómica o nanotecnología sin criterio científico? Se debe tomar conciencia de que la prevalencia de creencias y prejuicios más basados en la ignorancia o la pseudociencia que en la buena ciencia afecta negativamente a la calidad de los programas de formación y la efectividad de la práctica profesional.

Propuestas de intervención

A continuación se realizan algunas recomendaciones de intervención dirigidas a instituciones y organismos responsables de la formación en el ámbito de la actividad física y el deporte para promover una práctica profesional basada en evidencias científicas contrastadas y actualizadas, como:

- Revisar la calidad del material docente de los programas de formación en base a los indicadores de calidad científica.
- Evitar proporcionar recetas prácticas sin asociarlas a teorías científicas actualizadas.
- Introducir el desarrollo de teorías científicas desde una perspectiva histórica para promover la adquisición de un pensamiento crítico en el alumnado.
- Ayudar al alumnado a distinguir ciencia de pseudociencia (Lilienfeld, Ammirati y David, 2012) y a utilizar índices de calidad para seleccionar las publicaciones.
- Promover mentes abiertas hacia nuevos modelos y teorías científicas.
- Alimentar la formación en CAFD de los avances que están en la vanguardia de la ciencia y no limitarse al conocimiento tradicional hegemónico de las disciplinas científicas.
- Desarrollar perfiles profesionales practicocientíficos y fomentar la colaboración interdisciplinaria.
- Valorar tanto la investigación básica como la aplicada en el desarrollo de las CAFD y valorar el deporte como fenómeno del que se pueden extraer leyes fundamentales para la ciencia en general.

Acknowledgements

To our colleagues with whom we were able to share the original, for their contributions and the interesting and fruitful discussions on the topic.

Conflict of Interests

No conflict of interest was reported by the authors.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración de las compañeras y compañeros con los que hemos podido compartir el original, por sus aportaciones y por las interesantes y fructíferas discusiones sobre el tema.

Conflicto de intereses

Las autorías no han comunicado ningún conflicto de intereses.

References

- Anderson, P. H. (1972). More is different. *Science*, *177*, 393-396. doi:10.1126/science.177.4047.393
- Araújo, D., Davids, K., & Hristovski, R. (2006). The ecological dynamics of decision making in sport. *Psychology of Sport and Exercise*, *7*(6), 653-676. doi:10.1016/j.psychsport.2006.07.002
- Bailey, R. P. (2017). Science, pseudoscience and exercise neuroscience: untangling the good, the bad, and the ugly. En R. Meeusen, S. Schaefer, P. Tomporowski & R. P. Bailey (Eds.), *Physical activity and educational achievement: Insights from exercise neuroscience* (pp. 335-359). London: Routledge.
- Bailey, R. P., Madigan, D. J., Cope, E., & Nicholls, A. R. (2018). The prevalence of pseudoscientific ideas and neuromyths among sports coaches. *Frontiers in Psychology*, *9*, 641. doi:10.3389/fpsyg.2018.00641
- Davids, K., Hristovski, R., Araújo, D., Balagué, N., Button, C., & Passos, P. (Eds.) (2014). *Complex systems in sport*. London: Routledge.
- Diamond, J. (agosto, 1987). Soft sciences are often harder than hard sciences. *Discover*, 34-39.
- Haken, H., Kelso, J. A. S., & Bunz, H. (1985). A theoretical model of phase transitions in human hand movements. *Biological Cybernetics*, *51*, 347-356. doi:10.1007/BF00336922

Referencias

- Hristovski, R., Aceski, A., Balagué, N., Seifert, L., Tufekcivski, A., & Aguirre, C. (2017). Structure and dynamics of European sports science textual contents: Analysis of ECSS abstracts (1996-2014). *European Journal of Sport Science*, *17*(1), 19-29. doi:10.1080/17461391.2016.1207709
- Karsenti, E. (2008). Self-organization in cell biology: A brief history. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, *9*, 255-262. doi:10.1038/nrm2357
- Lilienfeld, S. O., Ammirati, R., & David, M. (2012). Distinguishing science from pseudoscience in school psychology: Science and scientific thinking as safeguards against human error. *Journal of School Psychology*, *50*, 7-36. doi:10.1016/j.jsp.2011.09.006
- Sparkes, A. C., & Smith, B. (2014). *Qualitative research methods in sport, exercise and health: From process to product*. New York: Routledge/Taylor & Francis Group.
- Venhorst, A., Micklewright, D. P., & Noakes, T. D. (2018). The psychophysiological determinants of pacing behaviour and performance during prolonged endurance exercise: A performance level and competition outcome comparison. *Sports Medicine*, *48*(10), 2387-2400. doi:10.1007/s40279-018-0893-5
- Web of Science (2018). www.webofknowledge.com/

Article Citation | Citación del artículo

Balagué, N., Pol, R., & Guerrero, I. (2019). Science or Pseudoscience of Physical Activity and Sport? *Apunts. Educación Física y Deportes*, *136*, 129-136. doi:10.5672/apunts.2014-0983.es.(2019/2).136.09

3.2 On the relatedness and nestedness of constraints

CURRENT OPINION

Open Access



On the Relatedness and Nestedness of Constraints

Natàlia Balagué¹, Rafel Pol², Carlota Torrents³, Angel Ric⁴ and Robert Hristovski^{5*}

Abstract

The purpose of this opinion paper is providing a platform for explaining and discussing the relatedness and nestedness of constraints on the basis of four claims: (a) task constraints are distributed between the person and the environment and hence are relational variables, (b) being relational, task constraints are also emergent properties of the organism/environment system, (c) constraints are nested in timescales, and (d) a vast set of constraints are correlated through circular causality. Theoretical implications for improving the understanding of the constraints-led approach and practical applications for enhancing the manipulation of constraints in learning and training settings are proposed.

Keywords: Task constraints, Perceived affordances, Constraints-led approach, Nested organization, Timescales, Circular causality, Fast-changing constraints, Slow-changing constraints

Key Points

- Constraints are interdependent entities acting at different timescales.
- Task and task constraints, distributed between the person and the environment, are emergent properties of the organism/environment system.
- The knowledge of the hypothesized temporally nested organization of all types of constraints may provide a basis for improving the understanding and efficiency of learning/training processes.

Introduction

Constraints determine the way in which the multiple components of complex systems self-organize [1, 2] to produce reliable macroscopic functions [3]. According to Kugler et al. and Pattee, contrary to dynamic laws which are incorporeal and universal, constraints are always physically embodied and local [3, 4].

The concept of constraints is used in different scientific fields (e.g., mathematics, physics, computer science, biology, and linguistics) and refers to boundary conditions, limitations, or design features that apply restrictions to the

degrees of freedom of a system, thereby indicating the trajectories that the system may exhibit [3]. Constraints-led approaches based on Newell's model [5] have been applied to numerous movement science and sporting fields in recent years, including skill acquisition [6, 7], motor development [8], motor performance [9], medicine [10, 11], physical therapy and rehabilitation [12–14], physical conditioning [15, 16], sports biomechanics [17, 18], creative behavior [19, 20], and sport injuries [21]. Due to the integration of variables studied in different disciplines such as physiology, biomechanics, and psychology, the constraints-led approach has been suggested as a possible unifying framework for sport performance studies [22]. Although the proposal has received criticism [23–26], the integrative and practical potential of the constraints-led approach is indubitable.

Newell's classification [5] distinguishes three categories of constraints: organismic, environmental, and task-related. Organismic constraints are related to personal characteristics and are classified as structural or functional. The so-called structural organismic constraints tend to remain relatively constant over time (anthropometric characteristics, body composition, muscle architecture, and typology or personality), compared to “functional” organismic constraints, which change at a faster rate (physical condition, fatigue, motivation, cognition, effort perception, heart rate, or lactate concentration).

* Correspondence: robert_hristovski@yahoo.com

⁵Complex Systems in Sport Research Group, Faculty of Physical Education, Sport and Health, Ss. Cyril and Methodius University, Dimche Mirchev, Skopje 1000, Republic of Macedonia

Full list of author information is available at the end of the article

Environmental constraints are external to the organism and were initially distinguished as general (e.g., climate, temperature, light) and task-specific (e.g., implements, apparatus) [5]. As this distinction was not considered clear enough, Newell's initial proposal evolved towards the current classification which considers as environmental constraints all those outside the person, including the implements or apparatus, which were initially classified as task constraints [27]. Additionally, both physical and sociocultural constraints (e.g., fans' support, social pressure, score) are treated as environmental constraints [28].

Task constraints are usually defined as those specified by the task to be performed (e.g., ball size and shape, specific goals to be achieved, boundary lines, playing field length, number of opponents and teammates involved, situational characteristics of opponents such as players' relative position, and approach speed) [29]. They are related to the task goal, the environmental information, and the instructions and rules. Rules and instructions can simply constrain the task (e.g., say what is forbidden) or specify the response dynamics (e.g., prescribe the action solution or the pattern of coordination). For instance, a referee can award a penalty kick and signal the kick but does not impose the task solutions, i.e., actions (direction of the kick, type of shoot, etc.). In contrast, a competition rule may require the performance of a set of gymnastics skills. Thus, task constraints can be divided into specific, when they specify the movement form or action to be performed, and non-specific, when they do not specify it [5].

The ecological dynamics classifies task constraints as being instructional (rules and instructions), and informational, that is, related to the visual, acoustic, and haptic information that can be directly perceived by the performer, which is the basis of "affordances" (opportunities of action) [30]. While affordances have been recognized as relational [31–33], generally, task constraints have not yet been acknowledged as such. We discuss here how all types of tasks and task constraints, not only affordances, are distributed between the performer and the environment and are emergent properties of the performer–environment system.

In a similar vein, although some authors have referred to the timescales of task constraints [17, 34–36] and their nested organization [37], most of the previous work on the topic has focused on the behavioral space-time dynamics and space-time task constraints, as well as on the circular causality between the components and collective levels that form the behavioral variables [29, 38]. We plan to focus here on constraints, and not on behavioral variables, and explain how all types, not only task constraints, are interdependent, correlated through circular causality, and organized in a nested, i.e., embedded

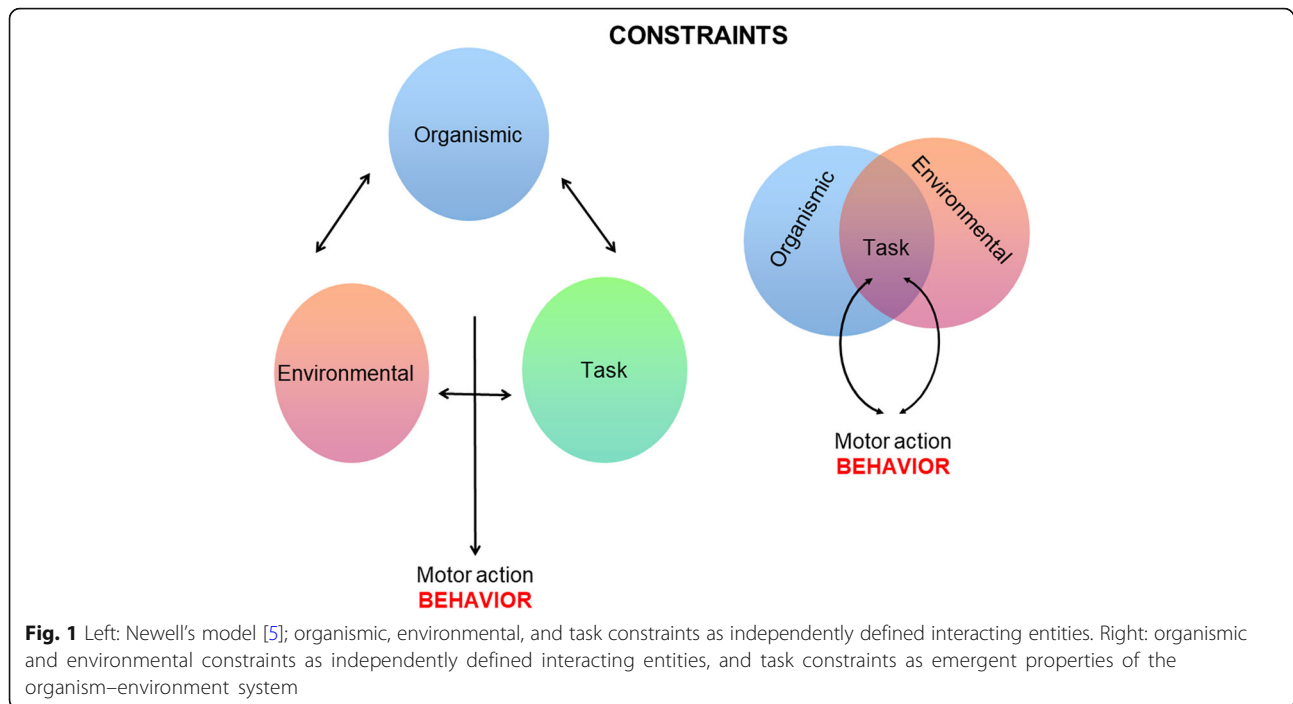
fashion, at levels defined by their characteristic timescales. Although behavioral variables (e.g., opponent's actions) may act also as constraints, in research and practice, one should always distinguish the role played by each variable in the model. In this respect, opponent's actions play the role of constraints when studying the game dynamics of one team and the role of state variable when studying the game dynamics of their opponents.

This opinion paper explains and discusses the relatedness and nestedness of constraints on the basis of four claims: (a) task constraints are distributed between the person and the environment, (b) task constraints are emergent entities, (c) constraints are nested in timescales, and (d) constraints are correlated through circular causality. Additionally, some theoretical and practical implications, addressed to improve the understanding and effectivity of constraints manipulation in learning and training settings, are proposed.

Why Task Constraints Are Distributed Between the Person and the Environment

We claim that task constraints, unlike the other two sources of constraints, are distributed variables and can only be defined at the systemic organism/environment level. It is worth noting that we consider organismic constraints, other than morphological, as dispositional properties that mold the establishment of functional relationships with the environment [39]. Disposition is a tendency, liability, or proneness to act or react, or fail to act or react, in a certain way in certain circumstances [40] (Fig. 1).

The objects of the environment and their properties (e.g., a ball and its size) *become task constraints* only when interacting with or relating to a goal-directed purposeful organism. Without an organism seeking for its goals, physical properties of the environment are just that - physical properties of nature. A ball may constrain other balls physically (e.g., gravitationally or by forces of friction) in the store, but such constraints cannot be called task constraints, simply because tasks can be defined only in the relation between goal-directed organisms and their environments. In general, the term constraint is by definition relational, because one can always ask "what constrains what." Even if a physical object, or an organism, constrains itself, that very constraint is a relation of the object or organism with itself. Without that relation, the term "task constraint" loses its meaning, and it only exists as a mere environmental property. As environmental *properties* become *task constraints* only for a certain organism, if the organism–environment relation vanishes or changes, the task *inevitably* vanishes or changes too. Designing a task means designing a certain *relation* between the



performer and the environment, outside of that relation a task does not exist.

The organism–environment interaction is defined as an influence of certain environmental properties on a goal-directed entity (organism) and sometimes vice versa. For example, the ball trajectory influences the actions of the player but also the player may change the ball trajectory (two-way interaction). On the other hand, the ball size and weight influence the perception–action of the player but not vice versa. It is not a two-way interaction. In both cases, if the goal-directed organism is not involved, we can say that environmental properties are not task constraints because we take the organism out of the equation. Any information, object, or force may potentially act as a constraint, but at each moment, only a subset of constraints acts significantly on the system (performer or team).

Whereas organismic constraints simultaneously belong to the organism *and* to the organism–environment system, but *not* to the environment *alone*, and the environmental constraints belong to the environment *and* the organism–environment system, but *not* to the organism *alone*, tasks and the associated *full set* of task constraints are distributed within the organism–environment system and, *as a set*, do not belong neither to the organism nor to the environment *alone*. For example, the height, the strength, the readiness to act, the attentional focus, and the task goal are organismic constraints, but not environmental constraints. The ball size and weight are environmental constraints, but not organismic constraints. The full set of task constraints, on the contrary, is a

union of both, the organismic (task goal) and the environmental constraints. As they are distributed and form a relationship at the level of organism–environment system, they can only be defined at systemic level. This is why task constraints differ ontologically from organismic and environmental constraints.

The inseparability of the organism–environment system [41] itself means that tasks, and hence task constraints, cannot be defined as a third separate entity that merely interacts with the environmental and organismic constraints. If the organism–environment system is the union of the elements of the organism, the environment, and the organism–environment system, then by definition, there can be nothing outside of this system (such as tasks or task constraints) which would interact with this system or its subsystems. Hence, in the Venn diagram, task constraints are represented as intersection of the organism–environment system, just as would follow from Turvey [41] (see Fig. 1, right). It should be noted that although some authors have used the intersection of circles to represent the interactions of the three different and independently defined types of constraints of Newell's model [22], in Fig. 1 (right), the intersection represents the distributedness, relatedness, and emergent nature of task constraints.

Affordances as Informational Task Constraints

Gibson [32] postulated that humans can perceive the features of the environment as possibilities for action and defined the relation of perception and action in terms of a circular flow. According to the perception–

action cycle, the environment is not perceived in terms of its objective properties (distances, angles, etc.) or in terms of expectations and mental representations linked to performance solutions [42]. The properties of the environment are scaled to the motor abilities of the performer [43], i.e., the environment is perceived in terms of what the organism can do with and in it, that is, in terms of affordances. In other words, affordances are values of use of objects or surfaces.

Through acting in the environment, the performer perceives such affordances; thus, it is the interaction of the organism with information from the environment that creates the informational constraints which define the affordances [44]. Figure 2 shows an example of affordances during a soccer match. Near the touchline, the player possessing the ball has reduced possibilities for escaping from the defender, who takes the opportunity to press forward. L. Messi, the attacker, perceives (in a few tenths of a second) the affordance of escaping from his defender by performing a tunnel. For Messi, this environmental property emerges and vanishes in a fraction of second, and hence, the *perception* of the affordance emerges and decays at the same timescale. Organismic constraints like speed of movement, strength, motor abilities, level of fatigue, motivation, or values (e.g., fair play), among others, constrain the affordances used by players during the match. It is important to point out that Messi's goal was probably to escape from the defender and maintain the possession of the ball, but not specifically by performing a tunnel. However, his goal constrained his attention and his attention constrained his perception, as will be explained below (see Fig. 4). Thus, the tunnel affordance, like other action solutions in sport that cannot be planned in advance, emerges spontaneously from the performer–environment interaction. Player's interpersonal distances, the distance between feet, or the players' relative velocity become task constraints only when they are actively perceived by performers; therefore, it can be said that informational task constraints are distributed between the organism and the environment.

Instructional Task Constraints (Rules and Instructions)

Instructional constraints are directly related to the task goal or action solution. They can be specific and provide

information on how to perform the action, or they can be non-specific (e.g., instruct what to avoid instead of what should be done) [45].

Rules and instructions may be considered as environmental information provided via social systems and transmitted through language (e.g., coach instructions, training/competition rules). This type of environmental social information should be assimilated by the performer in order to become a task constraint [46–48]. In fact, this information cannot be defined without goal-directed organisms for which those rules and instructions are valid. It is important to note that instructions, themselves, are just third person (e.g., coach's, referee's) references for the preferred in situ relations between the performer and the environment. This is one of the reasons why instructions do not have the same effects on all instructed performers. This means that goals, rules, and instructions, as other task constraints, are relational and distributed variables which exist at the systemic organism/environment level.

Tasks and Task Constraints Are Emergent Properties of the Organism–Environment System

Tasks are understood here as a set of interacting task constraints. As tasks and task constraints are distributed between the organism and the environment, they are necessarily emergent, either by design (e.g., through instructions) or spontaneously, i.e., by self-organization (e.g., Fig. 2). Properties that exist only at systemic (e.g., organism–environment) level, and not at levels below (e.g., organism or environment alone), are called emergent properties [49, 50]. In other words, for a property to be emergent, the necessary and sufficient condition is not to be a property of the system components. Note that this definition does not pose additional criteria to the system components properties and their interactions. Then, it is obviously incidental and not essential to the definition if the component interactions are designed, prescribed, or arise spontaneously, whether the system has central or distributed control or if the components have (or do not) a representation of the global system behavior.



Fig. 2 L. Messi enacting a tunnel to escape from a defender close to the touchline

The concept of emergent property has the same meaning for technical (e.g., robots), biological, physical, or social systems. However, it is important to note that not all properties at systemic (macro) level are emergent. For example, the mass of a system is only an extensive property because its components have the property of mass themselves.

While in physical, chemical, and biological systems emergent properties arise dominantly through self-organization, in social systems, the interactions among components (e.g., players) are sometimes planned, prescribed, and designed by an external agent (e.g., a coach). On the other hand, e.g., in small-sided games and matches, there are emergent properties which arise spontaneously by self-organization. This is because a large set of constraints and interactions between players change spontaneously, that is, they are not specifically designed or prescribed by the coach. When these interactions change, the task changes as well. Thus, during matches, old task constraints decay and new task constraints arise. In this case, one can say that tasks self-design.

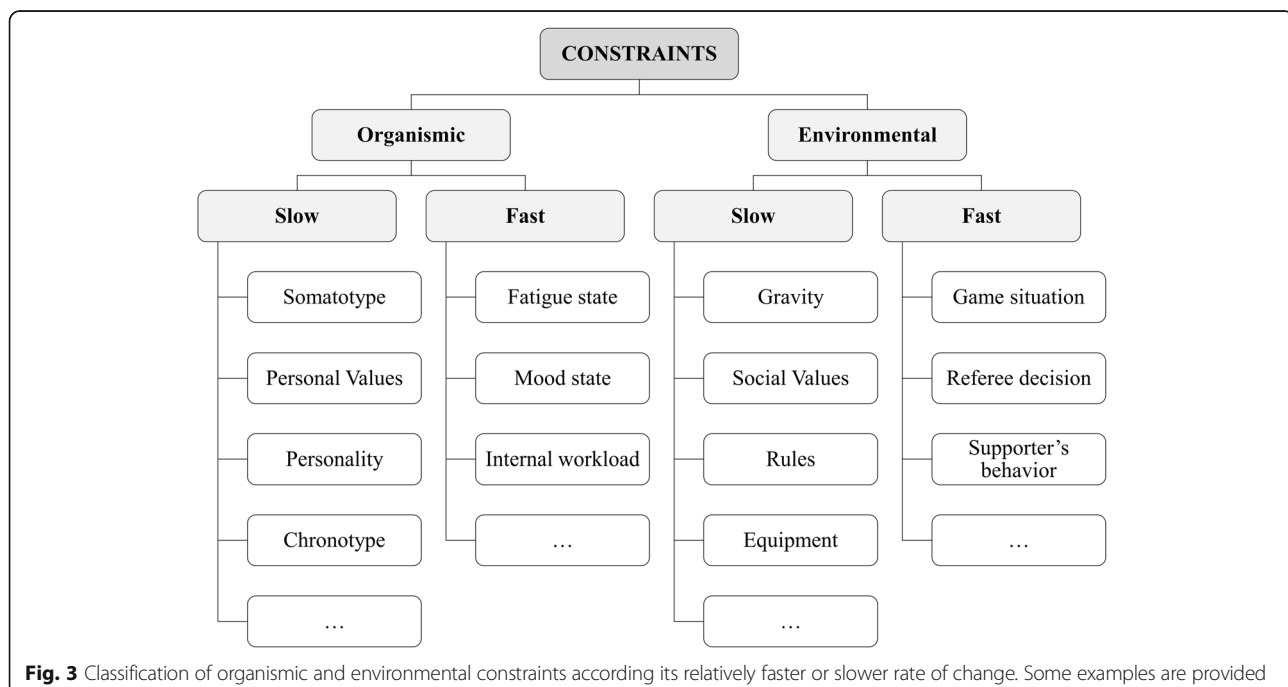
Task solutions, i.e., actions, always emerge from the in situ interactions between the organismic constraints (e.g., level of stress, fatigue or strength of the performer) and the environmental constraints (e.g., opponent's behavior, terrain). Additionally, actions emerge from the interaction between many other microscopic degrees of freedom acting at lower levels (nervous system, muscles, tendons, bones, joints, etc.).

Task constraints may have non-linear or non-proportional effects on performer's actions. This means that

while a change in a set of task constraints may have no visible effects, a further small change may produce a qualitative reorganization of the whole system [45]. For instance, while a substantial increase in the time on task may be adequately compensated through psychobiological synergies, an additional small increase in exercising time can suddenly produce task disengagement due to exhaustion [51], or a small deviation of the ball trajectory during a soccer match can lead to ball recovery and complete re-organization of both teams (e.g., during a counterattack). Game dynamics, characterized by its transitions, changes in ball possession, space occupation, tactical patterns, play rhythm, etc., may sometimes be guided by these non-linear effects which greatly increase the uncertainty of the game. These sudden changes, products of the interactions between a set of task constraints, emerge as *new tasks* spontaneously via self-organization (i.e., without being previously designed or imposed on the players or teams).

Constraints Act at Different Timescales

Some constraints change slowly with respect to the macroscopic function they produce and thus have a long-lasting effect and may be experienced as constant [51]. Newell [5] called them “structural” because they “freeze” the degrees of freedom. We propose calling them “slow-changing constraints” because they change at lower rates than “fast-changing constraints” (called “functional” by Newell). It is important to note that the terms “slow” and “fast” are *relative*. Constraints that are slowly evolving with respect to some more rapidly



evolving ones can be treated as fast with respect to some variable that evolves over a longer timescale. For instance, the somatotype is a slow-changing constraint and the affordances are fast-changing constraints with respect to player's technical actions during the game. The rates of change of constraints, having longer- and shorter-lasting effects on behavioral variables, reveal a nested organization of constraints in levels and timescales, which may have relevant implications when planning interventions (see the "[Theoretical and practical implications](#)" section).

Organismic and Environmental Constraints

Organismic constraints evolve structurally and functionally through the interaction with environmental constraints and vice versa. Slow-changing environmental constraints shape slow-changing evolutionary organismic constraints or traits (e.g., human structure and functions); relatively faster changing environmental constraints (e.g., fans' support) shape faster changing organismic constraints or states (e.g., mood); and even faster changing environmental constraints (e.g., ball trajectory) shape the even faster organismic constraints (e.g., perceptions). In turn, relatively slow-changing organismic constraints, such as habits, affect slow-changing environmental constraints (e.g., microclimate or relief paths), and faster changing organismic constraints (e.g., attention focus) produce faster changing environmental constraints (e.g., ball direction). These are usually two-way interactions, which can be related indirectly (e.g., through actions). Furthermore, constraints acting at different timescales also interact among them through circular causality (see the "[Multilevel and nested organization of constraints](#)" and "[Correlation of nested constraints through circular causality](#)" sections).

Figure 3 shows some examples of organismic and environmental constraints with faster and slower rates of change. As a guide, personal values and competition rules may change over decades, fatigue state and supporters' behavior may change within days or months, and internal workload and game situation may change within seconds or minutes.

Task Constraints

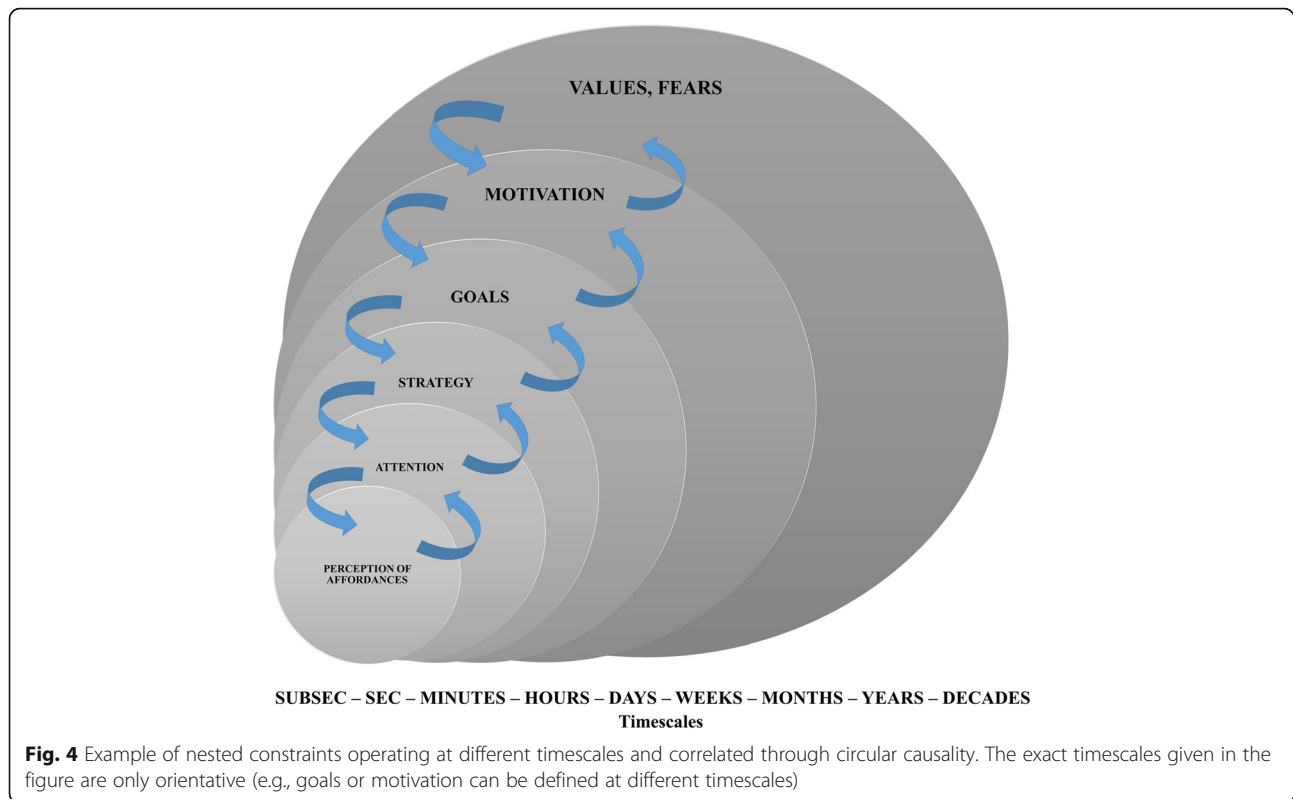
As the environmental information can either be actively perceived by the performer, e.g., players' relative position and approach speed [29], or create personal goals and intentions in the performer, task constraints may change at very different timescales. For instance, perception of affordances may occur within fractions of a second, task goals within minutes, team strategies within hours, and competition rules within decades.

Multilevel and Nested Organization of Constraints

The rate of change of constraints is related to their timescale effects on behavioral variables. The faster a

constraint changes, the shorter its effects on the behavioral variable, and vice versa. The different timescales of evolution of organismic, environmental, and developmental (ontogenetic and phylogenetic) constraints were briefly acknowledged in previous research [5, 34]. However, the nested organization of constraints in levels and timescales in human systems has only recently been discussed in the case of task constraints [37]. These authors showed that task constraints on motor behavior are distributed across many interacting time scales rather than being provided at a single common timescale. To date, most of the relevant research has been conducted on the problems of how a single or a couple of (predominantly task) constraints channelize certain behavior within a single time scale. Torrents et al. provided some evidence of multilevel synergic effects between the team and player dynamics when changing task constraints. The exploratory capacity at the team level was significantly lower when professionals played in numerical superiority, and this was compensated by an increase in individual exploration and vice versa [52]. Due to the lack of research on the nested organization of constraints, more studies are needed to assess their multilevel effects on the behavioral dynamics at the level of players, dyads, and teams. At the player level, the teammate anthropometry has been shown to constrain the action of dribbling in 1-on-1 basketball sub-phases [53]. At the dyadic level, the distance to the nearest opponent constrains the pass options [54]. Finally, at the team level, the collective behavior constrains players' actions [55]. During a game, different solutions emerge from the influence of constraints interacting at different timescales, from short (i.e., fatigue and emotions) to long (i.e., playing style and league culture).

We were not able to find any previous studies discussing the nestedness of the whole set of constraints (organismic, environmental, and task) and their possible circular causality relation. Our claim here is that in sports, all types of constraints, not only task constraints, possess this nested characteristic. Figure 4 shows an example of the multilevel nestedness and correlatedness of constraints. Values (lasting decades) constrain competition motivation which varies over a faster timescale (e.g., weeks, months), which in turn constrains short-term goals (e.g., days or weeks or) and competition strategies (e.g., lasting hours or minutes—a whole match). These constrain the performer's attention (e.g., minutes, seconds) and, in turn, the perception of his/her affordances (from fractions of a second to seconds), and other muscle processes defined at an even smaller timescale (e.g., metabolic pathways). Relative workloads are a nice example of action-scaled affordances that constrain the metabolic pathways. Short-term goals constrain attention not only through top-down pre-planned strategies. Under a fast-changing constraints



regime, as occurs during sporting competitions, goals (e.g., escape from the defender) directly constrain the perceived affordances, as shown in Fig. 2.

The sequence of nested constraints represented in Fig. 4 can, in turn, be reproduced at different timescales. For instance, the goal of having a successful sport career lasts longer than the goal of winning a championship, winning a match, or winning ball possession during the match. We can refer to fatigue status as being acute (days) and recovering fast, or chronic (months) and recovering slowly, or define workloads in the short term (session), mid-term (microcycle), or long term (season). It is worth to point out here that one may find slow-changing constraints evolving over decades not only at social or personal level (e.g., values) but also at molecular level (e.g., epigenetics).

The manipulation of constraints has been widely applied in motor learning and sport training, and specifically in small-sided games [56]. However, due to the limited literature capturing the nested structure of game constraints [57] and the relation between such levels [58], the concept of nested organization of constraints is still under-researched.

Correlation of Nested Constraints Through Circular Causality

Constraints at upper levels (slow-changing constraints) subjugate those at lower levels (faster changing constraints), which in turn form the constraints at the upper

level (circular causality). As many of the levels are related through circular causality (see Fig. 4), the correlation of constraints does not act only from top-down but also from bottom-up, that is, the slowly changing constraints, such as personal values, fears, goals, and motivation levels, create a long-term context impinging on the faster changing variables such as strategy and affordances. On the other hand, fast-changing constraints such as affordances influence the performance level (positively or negatively) and consequently the goal motivation and values. Interventions at the slowly changing constraints level (personal values, fears) enable a supporting context for successful intervention at the rapidly changing constraints level (goals, strategy, affordances) which is a prerequisite for successful behavioral dynamics in sports practice. In turn, a successful intervention at the level of fast-changing constraints (affordances) enhances slowly changing constraints (motivation, goals, and values).

Theoretical and Practical Implications

The distributedness and emergence of task constraints, as well as the interdependence of constraints and their nested organization in levels and timescales, has some relevant theoretical and practical implications for planning interventions. By defining task constraints as relational and emergent properties, we propose a dimensional reduction of Newell's model, passing from

three different and independently defined types of constraints (organismic, task, and environmental) to two (organismic and environmental), with the task constraints being a systemic property emerging from the interactions between subsets of both (see Fig. 1).

Furthermore, the interdependence and nested organization of constraints offer some practical advantages. An intervention in slow-changing constraints situated at upper levels (e.g., personal values) provokes a correlated cascade of effects on constraints acting at lower levels (i.e., motivational, attentional, conditional, biochemical, etc.). Due to their long-term evolution, upper levels (values, motivation, etc.) provide the general channelizing context for the detailed manipulation of task constraints. If such long-term constraints [59] decay, the whole system of faster constraints decays, and vice versa, and if they enhance, the whole system of faster constraints is enhanced. For instance, if a value such as active sports participation is high and stable, the motivation for practice increases, and thus, the context for manipulating workload properties (volume, intensity, complexity) and learning from affordances enhances as well. Such increase in workloads and fast and accurate perception of affordances increase the likelihood of goal constraints achievement (performance level) and, due to the circular causality, back-propagates enhancing and stabilizing the motivation [60] and value given to sport practice. In contrast, reduced long-term personal values towards sport practice reduces the motivation of athletes for interacting with challenging training/learning environments and produces cascade effects towards slower learning/performance effects (e.g., slower attunement to the environmental information and affordance perception) and general performance stalemate. Through circular causality and back-propagation (i.e., bottom-up effects), this decay in affordances perception may lead to the further decay of motivation and personal valuation of sports activity, which could bring about a nonlinear effect: a drop-off in sports participation. To prevent such drop-off and other nonlinear effects like sports injuries [21], the adequacy of task constraints (i.e., the adequate manipulation of environmental constraints in regard to the individual abilities) is crucial because it may enhance attention, and thus personal goals, motivation, and long-term personal values towards sport practice (see Fig. 4).

The nestedness of constraints can be found in other examples. A player constrained by the fair play value perceives different affordances than one who is not constrained by this fair play (e.g., the first has a vanishingly small likelihood of deliberately kicking the legs of a dangerous football attacker). The fear of failure or fear of success [61], acting as slowly changing long-term constraints, affect competition goals and strategies, attention, perceived affordances, and eventually, performance.

By manipulating the number of players, the size of the pitch, the score, or some playing/training strategies, coaches channelize all levels down, i.e., manipulate faster changing constraints (from tactical to biochemical), in a correlated way. Under this perspective, proposing, for instance, tasks detached from the game to activate specific metabolic pathways (e.g., aerobic/anaerobic) loose sense because the physiological/biochemical activation arises as a consequence of the nestedness of constraints when players respond to task features.

Coach instructions, as an environmental constraint, should be mainly addressed to processes developed over longer timescales, e.g., values, goals, and strategy. Instructions imposing specific action solutions (e.g., related to technical skills like dribble, pass, shoot, etc.), which may change over very short timescales during a game, can compete with the actively perceived affordances of the players and be counterproductive [62]. Thus, the coach type of instruction should be adequate to the action timescale and fit with the performer's organismic constraints. Additionally, differences in physical condition, expertise, level of skills, fatigue, or emotional state can change the perceived affordances of the players/athletes and decrease the effectiveness of some instructions. In turn, personal differences in cognitive abilities and motivational drivers can also produce changes in the effectiveness of instructions. While a motivated athlete can transform coach instructions in personal goals, a demotivated athlete may not. Whereas for actions requiring longer timescales (e.g., strategic planning), information via language may be effective in motivated and cognitively attuned athletes, for actions requiring shorter timescales (see Fig. 2), information coming from other perceptual systems should prevail.

Finally, the correlation of goals, intentions, and strategies at different timescales (e.g., short-, mid-, and long-term goals) seems crucial for long-lasting performance results, either defined at individual or team level.

Conclusions

In this opinion paper, we explain and discuss the emergent nature of tasks and task constraints, propose the classification of all types of constraints on the basis of their relative rate of change, and hypothesize about their temporally nested organization.

The definition of task constraints as systemic emergent properties of the organism/environment level provides a dimensional reduction of the constraints-led approach. Additionally, as all types of slow-changing constraints subjugate the rapidly changing constraints, a nested and correlated organization of constraints, interacting through circular causality, is hypothesized. The knowledge of such nested organization may help coaches understand and improve the efficiency of learning/training processes.

Acknowledgements

Non applicable

Funding

This study was supported by the National Institute of Physical Education of Catalonia (INEFC), Generalitat de Catalunya.

Availability of Data and Materials

Not applicable

Authors' Contributions

NB, RH, RP, CT, and AR conceived the paper and jointly drafted and reviewed the content. The authors approved the final version of the manuscript and agree to be accountable for all aspects of the work.

Author's Information

Non applicable

Ethics Approval and Consent to Participate

Not applicable

Consent for Publication

Not applicable

Competing Interests

The authors, Natàlia Balagué, Robert Hristovski, Rafel Pol, Carlota Torrents, and Àngel Ric, declare that they have no competing interests.

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Author details

¹Complex Systems in Sport Research Group, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), University of Barcelona (UB), Av. de l'Estadi, 12-22, 08038 Barcelona, Spain. ²Real Federación Española de Fútbol (Spain), Complex Systems in Sport Research Group, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), University of Lleida (UdL), Complex de la Caparrella, s/n, 25192 Lleida, Spain. ³Complex Systems in Sport Research Group, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), University of Lleida (UdL), Complex de la Caparrella, s/n, 25192 Lleida, Spain. ⁴F.C. Barcelona, Barcelona (Spain), Complex Systems in Sport Research Group, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), University of Lleida (UdL), Complex de la Caparrella, s/n, 25192 Lleida, Spain. ⁵Complex Systems in Sport Research Group, Faculty of Physical Education, Sport and Health, Ss. Cyril and Methodius University, Dimche Mirchev, Skopje 1000, Republic of Macedonia.

Received: 20 July 2018 Accepted: 14 January 2019

Published online: 11 February 2019

References

- Haken H. Synergetics: an approach to self-organization in self-organizing Systems. The emergence of order. In: Yates FE, editor. *Life Sci. Monogr.* 21. New York: Plenum; 1987. p. 417–34.
- Nicolas G, Prigogine I. *Self-organization in nonequilibrium systems: from dissipative structures to order through fluctuations.* New York: Wiley; 1977.
- Kugler NP, Kelso JAS, Turvey MT. On the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. Theoretical lines of convergence. In: Stelmach GE, Requin J, editors. *Tutorials Mot. Behav.* Amsterdam: North-Holland Publishing Company; 1980.
- Pattee, H.H. The nature of hierarchical controls in living matter. In: Rosen R, editor. *Foundations of mathematical biology 1.* New York: Academic Press; 1972, p. 1–22.
- Newell KM. Constraints on the development of coordination. In: Wade MG, Whiting TA, editors. *Mot. Dev. Child. Asp. Coord. Control.* Dordrecht: MartinusNijhoff; 1986. p. 341–60.
- Renshaw I, Davids K, Savelsbergh GJP. *Motor learning in practice: a constraints-led approach.* Oxon: Routledge; 2010.
- Davids K, Button C, Bennett S. *Dynamics of skill acquisition: a constraints-led approach.* Champaign: Human Kinetics Publishers; 2008.
- Haywood K, Getchell N. *Life span motor development.* Champaign: Human Kinetics; 2014.
- Glazier PS, Robins MT. Self-organisation and constraints in sports performance. In: McGarry T, O'Donoghue P, Sampaio J, editors. *Routledge Handb. Sport. Perform. Anal.* London: Routledge; 2013. p. 42–51.
- McKeon PO, Hertel J. The dynamical-systems approach to studying athletic injury. *Athl Ther Today.* 2006;11:31–3.
- Davids K, Glazier P, Araújo D, Bartlett R. Movement systems as dynamical systems: the functional role of variability and its implications for sports medicine. *Sport. Med.* 2003;33:245–60.
- Holt KG, Wagenaar RO, Saltzman E. A dynamic systems/constraints approach to rehabilitation. *Rev Bras Fisioter.* 2010;14:446–63.
- Newell K, Valvano J. Therapeutic intervention as a constraint in learning and relearning movement skills. *Scand J Occup Ther.* 1998;5:51–7.
- Wikstrom EA, Hubbard-Turner T, McKeon PO. Understanding and treating lateral ankle sprains and their consequences: a constraints-based approach. *Sport. Med.* 2013;43:385–93.
- Holmberg PM, Science E, Oaks T. Agility training for experienced athletes: a dynamical systems approach. *Strength Cond J.* 2009;31:73–8.
- Jeffreys I. A task-based approach to developing context-specific agility. *Strength Cond. J.* 2011;33:52–9.
- Glazier PS, Davids K. Constraints on the complete optimization of human motion. *Sport Med.* 2009;39:15–28.
- Seifert L, Chollet D. Inter-limb coordination and constraints in swimming: a review. In: Beaulieu N, editor. *Phys. Act. Child. New res.* New York: Nova Science Publishers; 2008. p. 65–93.
- Torrents C, Ric A, Hristovski R. Creativity and emergence of specific dance movements using instructional constraints. *Psychol. Aesthetics, Creat. Arts* 2015;9:65–74.
- Stokes PD. Creativity from constraints: what can we learn from Motherwell? from Modrian? from Klee? *J Creat Behav.* 2008;42:223–36.
- Pol R, Hristovski R, Medina D, Balagué N. From micro to macroscopic sports injuries. Applying the complex systems dynamics approach to sports medicine –narrative review. *Br J Sports Med.* 2018;0:1–8.
- Glazier P. Towards a grand unifying theory of sports performance. *Hum Mov Sci.* 2015;56:139–56.
- Cardinale M. Commentary on "Towards a Grand Unified Theory of sports performance.". *Hum Mov Sci.* 2017;56:160–2.
- Hackfort D. Commentary on "Towards a Grand Unified Theory of sports performance.". *Hum Mov Sci.* 2017;56:166–8.
- Seifert L, Araújo D, Komar J, Davids K. Understanding constraints on sport performance from the complexity sciences paradigm: an ecological dynamics framework. *Hum Mov Sci.* 2017;56:178–80.
- Rein R, Perl J, Memmert D. Maybe a tad early for a Grand Unified Theory. *Hum Mov Sci.* 2017;56:173–5.
- Newell KM, Jordan K. Task constraints and movement organization: a common language. In: Davis WE, Broadhead GD, editors. *Ecol. task Anal. Mov.* Champaign, IL: Human Kinetics; 2007. p. 5–23.
- Chow JY, Davids K, Button C, Shuttleworth R, Renshaw I, Araújo D. Nonlinear pedagogy: a constraints-led framework for understanding emergence of game play and movement skills. *Nonlinear Dynamics Psychol Life Sci.* 2006;10:71–103.
- Passos P, Araújo D, Davids K, Shuttleworth R. Manipulating constraints to train decision making in rugby union. *Int J Sports Sci Coach.* 2008;3: 125–40.
- Araújo D, Davids K, Hristovski R. The ecological dynamics of decision making in sport. *Psychol Sport Exerc.* 2006;7(6):653–76.
- Riccio GE, Stoffregen TA. Affordances as constraints on the control of stance. *Hum. Mov. Sci.* 1988;7(2):265–300.
- Gibson JJ. *The ecological approach to visual perception.* Boston: Houghton Mifflin; 1979.
- Chemero A. An outline of a theory of affordances. *Ecol Psychol.* 2003;15:181–95.
- Newell KM, Liu Y-T, Mayer-Kress G. Time scales in motor learning and development. *Psychol Rev.* 2001;108:57–82.
- Renshaw I, Davids K. Nested task constraints shape continuous perception-action coupling control during human locomotor pointing. *Neurosci Lett.* 2004;369:93–8.
- Renshaw I, Chow JY, Davids K, Hammond J. A constraints-led perspective to understanding skill acquisition and game play: a basis for integration of motor learning theory and physical education praxis? *Phys Educ Sport Pedagog.* 2010;15:117–37.

37. Wijnants ML, Cox RFA, Hasselman F, Bosman AMT, Van Orden G. A trade-off study revealing nested timescales of constraint. *Front Physiol.* 2012;3:116.
38. Passos P, Davids K. Learning design to facilitate interactive behaviours in team sports. *RICYDE Rev Int Ciencias del Deporte.* 2015;11:18–32.
39. Withagen R, Michaels CF. On ecological conceptualizations of perceptual systems and action systems. *Theory Psychol.* 2005;15:603–20 (p. 616).
40. Lyons WE. Gilbert Ryle: an introduction to his philosophy. Atlantic Highlands, NJ: Humanities Press; 1980.
41. Turvey M. On the notion and implications of organism-environment system. *Ecol Psychol.* 2009;21:97–111.
42. Richardson MJ, Marsh KL, Baron RM. Judging and actualizing intrapersonal and interpersonal affordances. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* 2007;33:845–59.
43. Hristovski R, Davids K, Araújo D, Button C. How boxers decide to punch a target: emergent behaviour in nonlinear dynamical movement systems. *J Sport Sci Med.* 2006;5:60–73.
44. Fajen BR, Riley MA, Turvey MT. Information, affordances, and the control of action in sport. *Int J Sport Psychol.* 2009;40:79–107.
45. Kelso JAS. *Dynamic patterns. The self-organization of brain and behaviour.* Cambridge: MIT Press; 1995.
46. Raczaszek-Leonardi J, Scott Kelso JA. Reconciling symbolic and dynamic aspects of language: toward a dynamic psycholinguistics. *New Ideas Psychol.* 2008;26:193–207.
47. Fusaroli R, Raczaszek-Leonardi J, Tuyen K. Dialogue as interpersonal synergy. *New Ideas Psychol.* 2014;32:147–57.
48. Raczaszek-Leonardi J, Debska A, Sochanowicz A. Pooling the ground: understanding and coordination in collective sense making. *Front Psychol.* 2014;5:1233.
49. Hitchins DK. *Systems engineering. A 21st century systems methodology.* Chichester: John Wiley & Sons; 2007. p. 21.
50. Teller P. In: Beckermann A, Flohr H, Jaegwon K, editors. *Emergence or reduction? Essays on the prospects of nonreductive physicalism.* Berlin: Walter de Gruyter; 1992. p. 139–53.
51. Vázquez P, Hristovski R, Balagué N. The path to exhaustion: time variability properties of coordinative synergies during continuous exercise. *Front Fractal Physiol.* 2016;7:1–8.
52. Torrents C, Hristovski R, Coterón J, Ric A. Interpersonal coordination in contact improvisation dance. In: Passos P, Chow JY, Davids K, editors. *Interpers. Coord. Perform. Soc. Syst.* Oxon: Routledge; 2016. p. 94–108.
53. Torrents C, Ric A, Hristovski R, Torres-Ronda L, Vicente E, Sampaio J. Emergence of exploratory, technical and tactical behaviour in small-sided soccer games when manipulating the number of teammates and opponents. *PLoS One.* 2016;11:e0168866.
54. Bourbousson J, Deschamps T, Travassos B. From players to teams: towards a multi-level approach of game constraints in team sports. *Int J Sports Sci Coach.* 2014;9:1393–406.
55. Travassos B, Araújo D, Davids K, Esteves PT, Fernandes O. Improving passing actions in team sports by developing interpersonal interactions between players. *Int J Sport Sci Coach.* 2012;7:677–88.
56. Davids K, Araújo D, Correia V, Vilar L. How small-sided and conditioned games enhance acquisition of movement and decision-making skills. *Exerc Sport Sci Rev.* 2013;41:154–61.
57. Ric A, Hristovski R, Gonçalves B, Torres L, Sampaio J, Torrents C. Timescales for exploratory tactical behaviour in football small-sided games. *J Sports Sci.* 2016;41:1–8.
58. Ric A, Torrents C, Gonçalves B, Sampaio J, Hristovski R. Soft-assembled multilevel dynamics of tactical behaviors in soccer. *Front Psychol.* 2016;7:1513.
59. Duda JL. Goals: a social cognitive approach to the study of achievement motivation in sport. In: Singer RN, Murphey M, Tennant LK, editors. *Handb. Res. Sport Psychol.* New York: Macmillan; 1993. p. 421–36.
60. Headrick J, Renshaw I, Davids K, Pinder RA, Araújo D. The dynamics of expertise acquisition in sport: the role of affective learning design. *Psychol Sport Exerc.* 2015;16:83–90.
61. Conroy DE, Willow JP, Metzler JN. Multidimensional fear of failure measurement: the performance failure appraisal inventory. *J Appl Sport Psychol.* 2002;14:76–90.
62. Hristovski R, Davids K, Araújo D. Information for regulating action in sport: metastability and emergence of tactical solutions under ecological constraints. In: Araújo D, Ripoll H, Raab M, editors. *Perspect. Cogn. action Sport.* New York: Nova Science Publishers; 2009. p. 43–57.

Submit your manuscript to a SpringerOpen[®] journal and benefit from:

- Convenient online submission
- Rigorous peer review
- Open access: articles freely available online
- High visibility within the field
- Retaining the copyright to your article

Submit your next manuscript at ► [springeropen.com](https://www.springeropen.com)

3.3 Training or synergizing? Complex systems principles change the understanding of sports processes

CURRENT OPINION

Open Access



Training or Synergizing? Complex Systems Principles Change the Understanding of Sport Processes

Rafel Pol¹, Natàlia Balagué^{2*} , Angel Ric³, Carlota Torrents⁴, John Kiely⁵ and Robert Hristovski⁶

Abstract

There is a need to update scientific assumptions in sport to promote the critical thinking of scientists, coaches, and practitioners and improve their methodological decisions. On the basis of complex systems science and theories of biological evolution, a systematization and update of theoretical and methodological principles to transform the understanding of sports training is provided. The classical focus on learning/acquiring skills and fitness is replaced by the aim of increasing the diversity/unpredictability potential of teams/athletes through the development of synergies. This development is underpinned by the properties of hierarchical organization and circular causality of constraints, that is, the nestedness of constraints acting at different levels and timescales. These properties, that integrate bottom-up and top-down all dimensions and levels of performance (from social to genetic), apply to all types of sport, ages, or levels of expertise and can be transferred to other fields (e.g., education, health, management). The team as the main training unit of intervention, the dynamic concept of task representativeness, and the co-adaptive and synergic role of the agents are some few practical consequences of moving from training to synergizing.

Keywords: Team synergies, Nonlinear dynamics, Nested organization, Timescales, Diversity potential, Constraints

Key Points

- The fittest are not necessarily the strongest or fastest but the most diverse.
- Diversity is developed by creating synergies through the strategic manipulation of constraints.
- The interdependence, temporal nestedness, and circular causality of constraints acting at different levels and timescales integrate all dimensions and levels of performance in a correlated way
- Synergizing, instead of training, defines an improved understanding of the process and helps scientists, coaches, and practitioners to create safer and effective interventions.

Introduction

In recent decades, sports training has rapidly evolved, in large part, as a consequence of science-led advances [1]. However, some core assumptions and methodologies have remained unchallenged and unchanged despite the fact that their underpinning theories have disintegrated [2]. Recent research suggests that coaches commonly acquire coaching knowledge from informal, self-directed learning sources and subsequently approach new information in an inefficient fashion [3, 4], thereby limiting practitioners development of open-mindedness, self-reflection, and critical thinking skills. In fact, when expert coaches' perceptions and practices are studied, attention is most commonly placed on *what* they do, rather than *why* and *how* they do it [3, 5]. The subsequent presumption that practical experience is more relevant than scientific theories, accordingly, is commonplace within coaching cultures and may in part explain the prevalence of pseudoscience in professional practice [6]. The methodologies inspired by

* Correspondence: nataliabalague@gmail.com

²Complex Systems in Sport Research Group, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), University of Barcelona (UB), Av. de l'Estadi, 12-22, 08038 Barcelona, Spain
Full list of author information is available at the end of the article

successful practitioners are often perpetuated, yet rarely questioned. Academic insights, in contrast, are frequently ignored and discounted. Sports and exercise physiology and psychology, perhaps the two most influential sports science disciplines, are characterized by a strongly reductionist philosophy and remain largely impervious to the transdisciplinary and holistic theories emanating from the science of complex systems [4, 6]. This explains why reductionist thinking persists across the sports sciences—even in recently emerging integrative approaches focused on skill acquisition and interpersonal coordination [7, 8]. Eccentric strength and lactate-based endurance training programs are two well-known examples of reductionist approaches to sport training. Eccentric exercise programs are based on the assumption that high muscle strains, resulting from large tensile forces, drive more advantageous tissue remodelling as shown when testing single fibers *in vitro* [9]. This assumption, however, ignores that the critical tensile forces that produce strain *in vitro* cannot be applied to muscles *in vivo* [9]. Nonetheless, despite their low level of evidence and potential adverse effects [10–12], eccentric training programs are extensively promoted to prevent injuries [13]. Similarly, lactate-based training prescriptions, which equate blood lactate concentrations to internal load, are commonplace in endurance sports [14]. In this context, the monitoring and modulation of heart rates, corresponding to specific blood lactate concentrations, are used to regulate external loads. Clearly, however, there is a significant uncoupling between internal and external loads under the acknowledged influence of multiple ever-varying contextual interactions [15]. Similarly, the segregation of performance into distinct dimensions (physical, technical, tactical, cognitive) and the consideration of players/dyads as the main training units in team sports, instead of the whole team, are other examples of the strong reductionist influence permeating sports science domains.

Clearly, there is a need to update theoretical training assumptions on the basis of advances in neuroscience and dynamic complex systems science. However, potential training innovations frequently encounter a resistance to change within coaching contexts [2, 5]. For instance, one may ask: (a) are complex science based methodologies really new? Or (b) if traditional training methodologies are tried and tested [16], why should they be changed? Why adopt methodologies of unknown efficacy? After all, increasing practice variability, during interventions like small-sided and conditioning games, was already a feature of sports practice before complex systems methodologies were developed.

What is relevant to emphasize here, however, is that such interventions were typically sporadically used and for the most part were substantiated only on the basis of experiential and intuitive knowledge, without clear insight or academic rationalization as to *why* such

interventions offer enhanced outcomes. Importantly, understanding enables generalization and functional transfer of the application to different contexts. In fact, training interventions are not intrinsically valid or invalid but contextually more (in)appropriate or (un)functional. For instance, a strict prescription can be adequate for a stressed novice (e.g., before a penalty kick) but inadequate for an expert player. Recognizing the appropriateness of certain interventions demands that sport scientists and coaches do not simply rely on personal, and inevitably biased, interpretations of their own experiences. Effective training judgement and decision-making require a deep understanding of the properties of the systems (athletes/teams), the principles that dictate their interactions within the environment, and well-defined process objectives. Here, we propose to improve the understanding of such properties and principles on the basis of complex systems and evolutionary biology. Under the complex systems framework, we include numerous theoretical and practical approaches of different spectrum (more general and more applied) sharing principles: synergetics, nonlinear science, dynamic systems, coordination dynamics, ecological physics, ecological dynamics, nonlinear pedagogy, differential learning, etc. To avoid confusion, we are not suggesting a new term to describe this contribution. It is not a new method or approach, it is simply an attempt to question old assumptions and in so doing to improve the understanding of sport scientists, coaches, and practitioners. The final aim is to promote safer and more efficient interventions across all sports, ages, and levels of expertise. The basis of these assumptions is rooted in referenced works, mainly drawing on the evidence base underpinning the constraints-led approach (CLA). The hypothesized, and novel, principles subsequently provide a background for future experimental research.

First, we propose a systematization and extended application of theoretical and methodological principles, based on dynamic complex systems [17, 18], biological evolution [19], and the CLA [1, 17, 18]. Secondly, we emphasize underexplored aspects of the CLA, such as, the interdependent and temporally nested organization of constraints, and the classification and focus of task constraints. Finally, we highlight the safety aspects of the contribution to promote the integration of prevention and performance training. Tables 1 and 2 summarize and contrast the theoretical and methodological principles of the process defined as training¹ (traditional approach) and synergizing² (complex systems-based approach), respectively, developed in the text.

¹The process of learning the skills you need to do a particular job or activity

²To combine or work together in order to be more effective

Table 1 Training or synergizing? Contrast of theoretical principles

Approach	Training (traditional)	Synergizing (complex systems)
Conception of athletes/teams	Machines	Complex adaptive systems
Conception of sport	Static entity	Dynamic entity
Scientific approach	Cybernetic Control Theory	Dynamic Systems Theory
Relations among components	Linear cause-effect	Nonlinear dynamic interactions
Integrating mechanisms	Control loops	Circular causality
Control	Internal/external programs	Spontaneous synergies
Organization	Externally designed	Self-organized
Adaptive properties	Homeostasis	Homeodynamics, synergetic reorganization, degeneracy, pleiotropy
Training goal	Maximizing performance attributes	Satisficing diversity/unpredictability potential
Training periodization	Pre-programmed	Co-adapted

Training or Synergizing? Contrast of Theoretical Principles

Conception of Athletes/Teams. Machines or Complex Adaptive Systems?

Individual athletes, teams, and sport games have recently been viewed as complex adaptive systems (CAS) [20–23] whose behavior evolves in response to physical and informational constraints³ (e.g., opponent's actions) [25]. From this perspective, athletes and teams are conceptualized as dynamic complex systems interacting non-linearly, i.e., co-adaptively, with the environment. This perspective contrasts with the conceptualization of human organisms as closed systems (e.g., machines or technical devices) with clearly separable cause-effect relations among components, time-invariant functions, and regulation profiles [26]. Under the framework of dynamic complex systems theory, the behavior of CAS cannot be understood independently from its context, and the training unit is the performer-environment system [27].

Due to the multilayer dynamics of environmental and personal constraints evolving and interacting at different time scales [28], sport is a dynamic entity which itself evolves with the transformation of performers, coaches, equipment, facilities, rules, etc. All these dynamically interacting and co-modulating factors change the pretended prototypic attributes of each sport (e.g., conditional requisites, skills, tactics).

Integrating Mechanisms. Control Loops or Circular Causality? Pre-programmed Processes or Spontaneous Synergies?

A key property of CAS is the spontaneous formation of structural and functional couplings among components (synergies) to achieve task goals [27, 29, 30]. During

sport practice, many degrees of freedom operating at diverse scales (from cellular to social) are continuously re-organized, forming functional goal-oriented synergies, i.e., coordinative structures that allow the reciprocal compensation of components. These synergies, defined at many levels (e.g., muscular, physiological, psychobiological, see [27, 29, 31–34]), constitute embedded coalitions of molecules, muscles, neurons, etc. In the context of the performer-environment system, they tend to operate as unitary ensembles constrained by opponent's actions or achievement challenges [20]. As each level is nested in the next one, functions are dynamically coupled, and there is no need of a template or plan to rule the relations. In the context of team sports, this entails that, from cellular processes (e.g., biochemical) to collective team synergies (tactical behavior), all functions are dynamically integrated without the need of internal or external programs.

When imposing constraints (variability) on the system, the coupled components in the synergy change together, rather than independently. Thus, instead of the pre-programmed circuits and feedback loops that control and integrate machine functionality, in CAS synergies emerge spontaneously and have circular causal relations with components: thus, components form synergies and those synergies, in turn, govern the components' behavior [35].

Traditional training approaches, focused on training components (e.g., players in team sports, aerobic and anaerobic metabolic pathways in physical conditioning), ignore that those components are coupled and have integrating properties that feedback, and feed-forward circuits do not have. The self-assembled, adaptive interactions drive structural and functional variability, and underpin robustness-enabling properties of CAS such as degeneracy (structurally different

³In the CLA, constraints refer to boundary conditions or limitations that promote the emergence of synergies restricting the degrees of freedom of teams/athletes [24].

⁴By "fittest" Darwin meant "better adapted for the immediate, local environment."

Table 2 Training or synergizing? Contrast of methodological principles

Approach	Training (traditional)	Synergizing (complex systems)
Programs	Fixed training programs	Contextually sensitive methodological criteria
Performers	Executers	Co-designers of the process
Periodization	Fixed, decontextualized	Contextually sensitive
Conditioning, skill acquisition, motor abilities training	Prescription-based	Based on nested dependence and circular causality of constraints
Training unit	Performers and their components Players (team sports)	Performer-environment system Team (team sports)
Short-term training plan	Based on stereotyped performance solutions and movement templates	Based on exploration of representative performance contexts
Training tasks	Non-representative (through task decomposition)	High level of representativeness (through task simplification) and beyond
Training exercises criteria	Right/wrong	Contextually (un)functional
Evaluation	Fragmented	Holistic
Role of the coach	Prescribing solutions	Co-discovering with the performer

components can produce the same function) and pleiotropy (the same components may be assembled to produce multiple functions) [35, 36]. Such properties enable the capacity of CAS to switch between diverse coordinative states while maintaining metastable dynamics [37].

Training Goal. Maximizing Performance Attributes or Satisficing Diversity/Unpredictability Potential?

In the context of biological evolution, when synergies prove to be functionally advantageous, synergistic selection and stabilization occurs. To maintain fitness and survive within competitive environments, athletes and teams must have sufficient in-group predictability (among support teams and teammates) to maintain coherent behaviors, yet, must be sufficiently unpredictable to disrupt opponents' strategies [38]. Here, the term *teammates* is understood in a wide sense (includes staff managers, etc.) and thus, is also valid for individual sports. Cooperation and competition, the two pillars of biological evolution that rule living systems behavior [19], are basic principles in sports. Contrary to common assumption, the fittest⁴ are not necessarily the strongest, nor the fastest, but the most diverse. Developing strength or velocity is just a means to gain diversity potential [38]. Particularly in sports like football, where the stability and reproducibility of game situations is rare, teams/players continuously deal with a highly unstable non-cooperative environment. In such contexts, survival (in the tournament, championship or league) is defined by positive competition results, which are better achieved through a higher diversity potential.

Because CAS competitors co-adapt, the dynamic stability of survival over long timescales can only be achieved through a continuous process of complexification, i.e., diversification and specialization of performance [19]. This is also true for other sports like gymnastics, athletics, or cyclic sports, where the environment is much more predictable. For instance, a gymnast has more chances to become dynamically stable (i.e., more competitive) by specializing and diversifying the elements of his/her floor routine. This process of complexification is defined by the athlete/team diversity/unpredictability potential [38]. This potential subsumes, but it is not equal to, the diverse functional synergies (reciprocal compensations) coping with diverse unpredictable environments created by the opponent's behavior and/or challenging environments (e.g., the height of a pole vault). These properties may, or may not, be based on degeneracy. Degeneracy refers to the capacity of attaining similar outcomes with structurally different components. However, diversity and unpredictability also include decision-making processes, e.g., the change of an intended outcome or the space of outcomes altogether. For example, unpredictability can come from a player making a pass (that is, outcome) using structurally different components (that is, different neuromusculo-skeletal components). However, a player may simply change the desired outcome (shooting or stopping instead of passing). Certainly, this may arise from changes in readiness to act on certain affordances. However, in this case, unpredictability or diversity does not come from degeneracy. Also, a player can change the intended outcome but continue to use the same motor pattern to attain the newly intended outcome. For instance, a player runs to intercept the ball (the initially intended outcome), then decides to let the ball pass since the teammate attains a better position for scoring

⁴By "fittest" Darwin meant "better adapted for the immediate, local environment."

(changes the intended outcome), but continues to run (maintains the same motor pattern) to mark a defender that tackles his teammate (third intended outcome). These and similar cases do not reduce action unpredictability and diversity to degeneracy alone. On another level of argument, it is important to emphasize that unpredictability is also a relational variable that arises within the performer-environment system. For unpredictability to exist, there must be an opponent striving to anticipate. Without the opponent, the athlete may be diverse, but not unpredictable. Variability, diversity, or degeneracy, on the other hand, refer to properties of an organism or a team alone.

It is important here to clarify the term *potential*. This term is used to signify that individuals and teams do not always have to exhibit high diversity of actions, if not constrained to do so. They only exhibit such high diversity of actions if the environment requires it [39–43]. Accordingly, the diversity potential of actions is distributed within the performer/team-environment system, and as such, represents a systemic property. Based on the relation of sport performance in non-cooperative environments with the diversity/unpredictability potential of athletes/teams [38], we emphasize that effective interventions should focus on:

a) *Increasing the athlete/team unpredictability potential* through the formation of new synergies at all levels. By forming new potential synergies, and becoming sensitive to each other's affordances, i.e., increasing the organization (predictability) of performers within teams, they become more unpredictable for the environment (opponents). The emergence of coordinated behaviors in sports teams is based on the formation of interpersonal synergies between players resulting from collective actions predicated on shared affordances [44]. Higher coordination means dimension reduction and mutual compensation [35, 45], due to the higher co-variation, or mutual information, between the players. Higher co-variation or mutual information means less within team (internal) unpredictability and, consequently, by definition, higher predictability (certainty) due to the mathematical meaning of these measures [35, 46]. This is why sometimes teammates train elaborate schemes of actions and passes, in order to create predictable within-team patterns of activity, which will be not so predictable to opponents. This is termed *functional diversity/unpredictability*. Accordingly, on average, players' behaviors are coordinated and more predictable within the team, than to the opponents. From the perspective of the athlete/team, the environment becomes more predictable. From the perspective of the opponents (environment), the athlete/team becomes more unpredictable. Athletes/teams who have more diverse degenerate options are more unpredictable and, accordingly, have greater competitive/performance potential.

b) *Have a sufficing diversity/unpredictability potential with respect to the opponent*. Co-adaptivity between opponents is driven by the principle of *sufficing* [47, 48]. This means that opposing athletes/teams always seek, not necessarily to maximize diversity/unpredictability (reaching the global optimum which is typically unattainable), but to develop a sufficiently large potential relative to their opponents (environment), thereby increasing their chances of winning. Performers seek context dependent local optima, i.e., best solutions under local context, that is, local set of constraints.

(c) *Non-decreasing unpredictability potential when constrained by the environment*. Robustly degenerate athletes/teams recover fast by increasing the unpredictability potential, when challenged by the environment and/or the opponent's actions. The level to which they recover unpredictability is regulated by the second (satisficing, a portmanteau combination of the words satisfy and suffice) principle. Athletes/teams do not use all their diversity/unpredictability potential during all competitions. Instead, they suffice to an appropriate level. This sufficing potential enables a level of diversity/unpredictability that promotes survivability and increases the probability of winning.

The larger degree of diversity potential is individual and realized through diverse actions, which may be defined at different levels and scales (e.g., neuromuscular, cardio-respiratory, (multi)joint, emotional, interpersonal).⁵ Due to synergies, one attribute can be compensated through the development of others to satisfy the task goal. Accordingly, the aim of a synergizing process is not to maximize performance attributes/dimensions but to develop satisficing diversity potential. This means learning to detect the sufficing threshold promoting survival and/or winning. Detecting the level to which the diversity/unpredictability potential has to be unleashed, depending on the opponent, is of utmost importance to athletes' and teams' performance success. High performance teams usually lose against less able teams because of this misdetection of sufficing diversity potential engagement. Specific training methodologies may be needed to develop this specific ability. Due to the degenerate properties of CAS [36], there are always alternate ways to achieve the task goal constraint. Hence, while some athletes/teams may gain diversity through the development of physical conditioning, others can do it through the development of coordinative motor skills. For instance, in achievement sports like 100 m running some sprinters can perform dominantly developing a

⁵Please notice that we avoid here to mention the classical performance attributes or dimensions (e.g., strength, endurance, velocity), sub-dimensions (explosive strength, reaction speed, etc.), or combinations of them (agility, strength endurance, etc.).

high muscle power and others through more refined coordination patterns. Thus, it does not make sense to train on the basis of a sport's supposed attribute prototypes.

Training Process. Pre-programmed or Co-adapted?

It is assumed that individual and collective sport behavior emerges from the performer-environment interaction acting at different timescales [28] (Fig. 1). This means that when the environment changes, the behavior increases its probabilities to change as well, and when the environment keeps stable (e.g., similar opponents, similar constraints), the exploratory behavior ceases, and the emergence of new synergies too [24]. The diversification/complexification process is self-organized and

cannot be pre-programmed. It requires not only varied challenging constraints but also novel technology to be evaluated [49]. Long-term training forecasts, as per conventional periodization models [2], are insufficiently responsive to flexibly adjust to such continuous and unpredictable co-adaptive performer-environment processes. In such contexts, it is the training process itself, and not the coach, that leads and shapes the coach-athlete interactions [50].

Training or Synergizing? Contrast of Methodological Principles

Training Programs or Methodological Criteria?

Fixed training programs assume the existence of decontextualized realities and ideal or prototypic static states

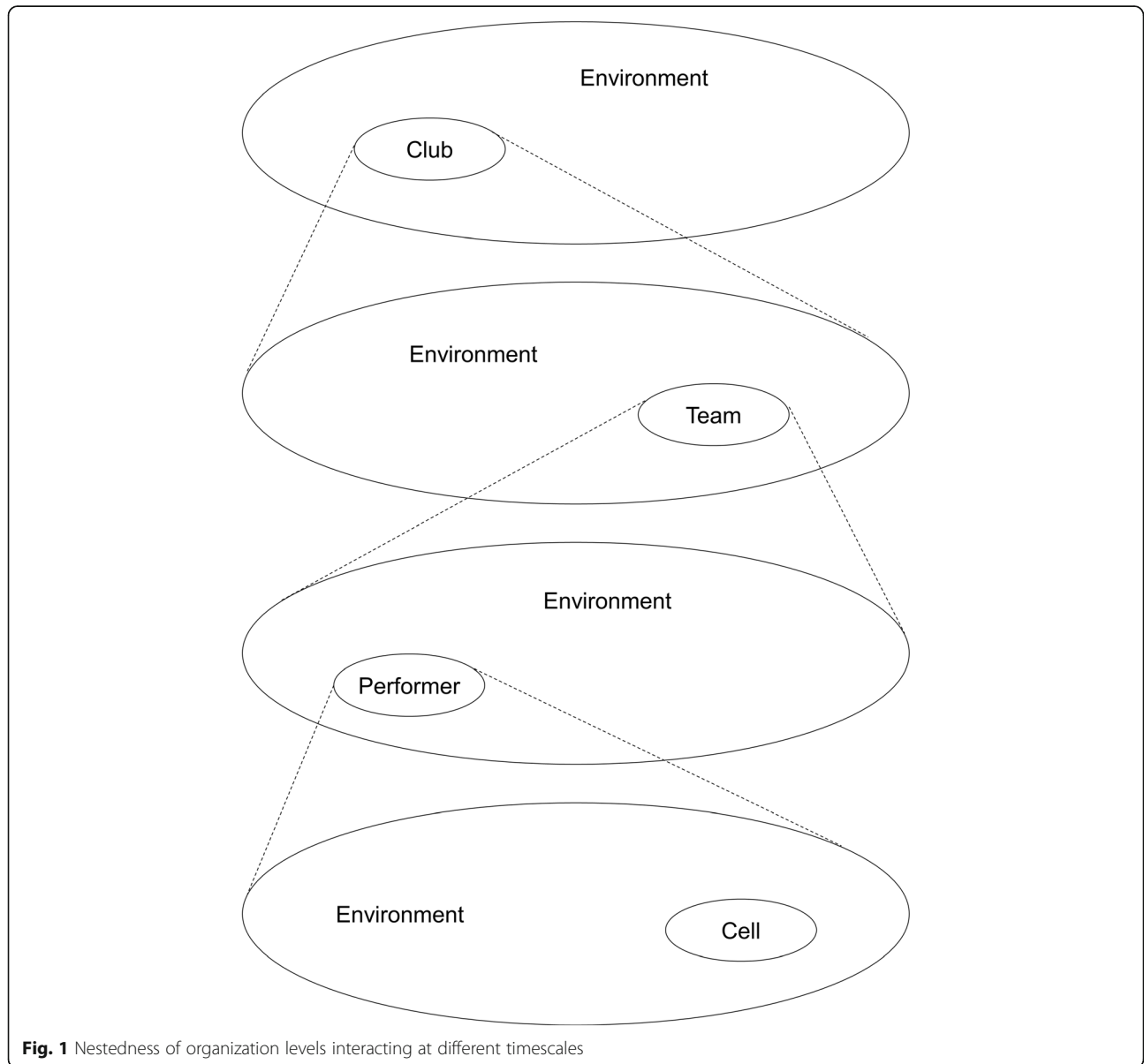


Fig. 1 Nestedness of organization levels interacting at different timescales

in athletes/teams. As neither intrapersonal, interpersonal, or environmental constraints are repeated during training processes, the replacement of fixed training programs by methodological criteria based on complex dynamic principles seems advantageous [42]. The levels of fatigue, the emotional state, or the opponent's behavior are only a few examples of constraints which demand continuous adjustments of training plans and which occur at shorter timescales than conventionally structured programs [2].

Complex dynamic principles (e.g., stability, instability, constraints, change of state...) are common to processes defined at multiple levels [42] and can be used as general methodological criteria. They are the fruit of compression, without fragmentation, of the huge complexity of levels (physiological, psychological, social, etc.) and timescales involved in sports training. Such criteria may embrace continuous, intertwined relationships between perception and action in different sport performance contexts.

Skill Acquisition. Dominance of Instructional-Based or Environmental-Based Constraints?

While technological devices require instructions to change the task outcome (program, etc.), CAS orchestrate changes without instructions, i.e., as a result of the interaction with environmental constraints. Instructions are environmental information provided via social systems (e.g., coach) [28]. This information should be acknowledged, understood, and transformed into performer intentions in order to become a task constraint [24]. All task constraints, either informational or instructional, are then distributed between the performer and the environment, and thus, they are necessarily emergent, either by design (e.g., through instructions) or spontaneously, i.e., by self-organization. Thus, one cannot expect the same instruction to have the same effects on all performers. While some instructions provide direct information on how to perform the action (i.e., what to do or what to avoid), other types of environmental constraints (e.g., distance to the opponent, velocity of the ball) also constrain the performer's affordances. While the former develops the dependency of the performer on instructions, the latter promotes the autonomy of the performer.

Instructions contribute to skill acquisition only if the CAS adequately understands the instruction and accurately transforms this instruction into personal intention.

In collective sports, both collective and individual performance is highly constrained by environmental factors [51–53]. The team's style, changing from match to match as a function of the opponents, match result, location (home or away), classification, etc., constrains the player's individual performance (e.g., distance covered,

amount of high-intensity runs, time of ball possession). Thus, individual performance, usually analyzed during competition, lacks relevance to the training of collective behavior. It is worth pointing out, here, that contrary to what is usually assumed, task constraints do not necessarily reduce, but may also increase, the degrees of freedom in a CAS [24]. Task constraints form boundaries around the exploration of certain action possibilities, while allowing the emergence of other exploration possibilities. When constraints reduce degrees of freedom, relevant information that coaches want performers to use is amplified.

Teams or Players As Training Units in Collective Sports?

The fragmentation of the body into subsystems, which are trained separately (e.g., cardiovascular or neuromuscular exercise programs), and the division of performance into distinct attributes (e.g., strength, endurance, velocity, etc.), which are also trained separately, is a common practice in traditional training methodologies. Similarly, a key assumption in team sports is that collective performance is achieved through the sum of individual behaviors. In fact, soccer schools usually focus on training players, rather than training teams. Furthermore, performance evaluation is also predominantly player oriented [54].

In teams, conceptualized as superorganisms, performance emerges from the interaction among the individual parts [55]. The creation of team synergies requires the exposure of the whole set of players to challenging constraints. This promotes collective exploration, discovery, and stabilization of unique solutions based on intra-team interactions. In such training contexts, changing the set of constraints is the main driver of exploration behavior [56].

The emerging collective properties of teams cannot be assigned to any single player, in a similar way that life, as an emergent property of neurobiological systems, cannot be assigned to any specific subsystem of the organism (e.g., cardiovascular endocrine). In this sense, teams are not part of the context in which players perform innovatively and creatively but are the innovative and creative entity targeted by training designs [57]. That is, the target in team sports is the team, and the manipulation of constraints is addressed to increase the team's potential diversity. This entails the development of networked team connectivity, the creation of new team synergies, and thus, the complexification of the team's functionality. Burke et al. [58] define team adaptation as a change in team performance that leads to a functional outcome for the entire team and manifests through changed structures, capacities, behavior, and goal-directed actions of the whole team. This is distinct from different

approaches in team sports, focused on the development of individual players' diversity potential [56, 59].

Due to the nestedness of constraints, there is no need to reduce the training unit to individual players in team sports or to a subsystem in individual sports. Team collaborative properties like exploration [40, 41], degeneracy [60, 61], synergies [62], and synchronization [43, 63], developed through challenging and varied environments, adequately diversify individual behavior in a correlated way. While individual properties of players are important for building specific interactions within teams, these properties are best developed while playing in collective contexts. These collaborative properties may show up in a variety of game situations which can be defined at different levels and timescales, including player's effectiveness (speed, endurance, strength, etc.), player's motivation, affection, flexibility, and creativity. The same rationale applied to collective sports can be applied to individual sports. Individual performers are also formed by collections of components and processes that interact within them, and with the environment, to satisfy a common purpose (survival in competition). Through challenging environmental contexts such components create new synergies promoting the development of their diversity potential, as has been shown in studies investigating the unintentional or spontaneous interpersonal synchronization of 100 m speed runners during competition [64]. The use of pacemakers, or rabbits, during long distance running is another example of how individual athletes increase their diversity potential in competition and beat their records.

Role of the Coach. Prescribing Actions or Manipulating Constraints?

Assuming that sports are dynamic entities and that sport behavior is a product of the performer-environment system, which is irreproducible and highly unpredictable in competitive environments, the role of the coach, fixing task outcomes and prescribing actions, is under question. Coaches do not know all possible solutions of a task. In addition, prescriptions promote a power-dependency based coach-athlete relationship, a command-action based coupling, and a limited performer involvement.

As previously mentioned, instead of prescribing actions, coaches can manipulate constraints (personal or environmental) to promote the creativity (potential diversity/unpredictability) and autonomy of the performers. In opposition sports, as new intentions and tasks emerge continuously over very short time scales, due to the opponent's behavior, performers act according to the newly perceived affordances and continuously shape new functional affordances. In this scenario, coaches' prescriptions of actions might be counterproductive if competing with

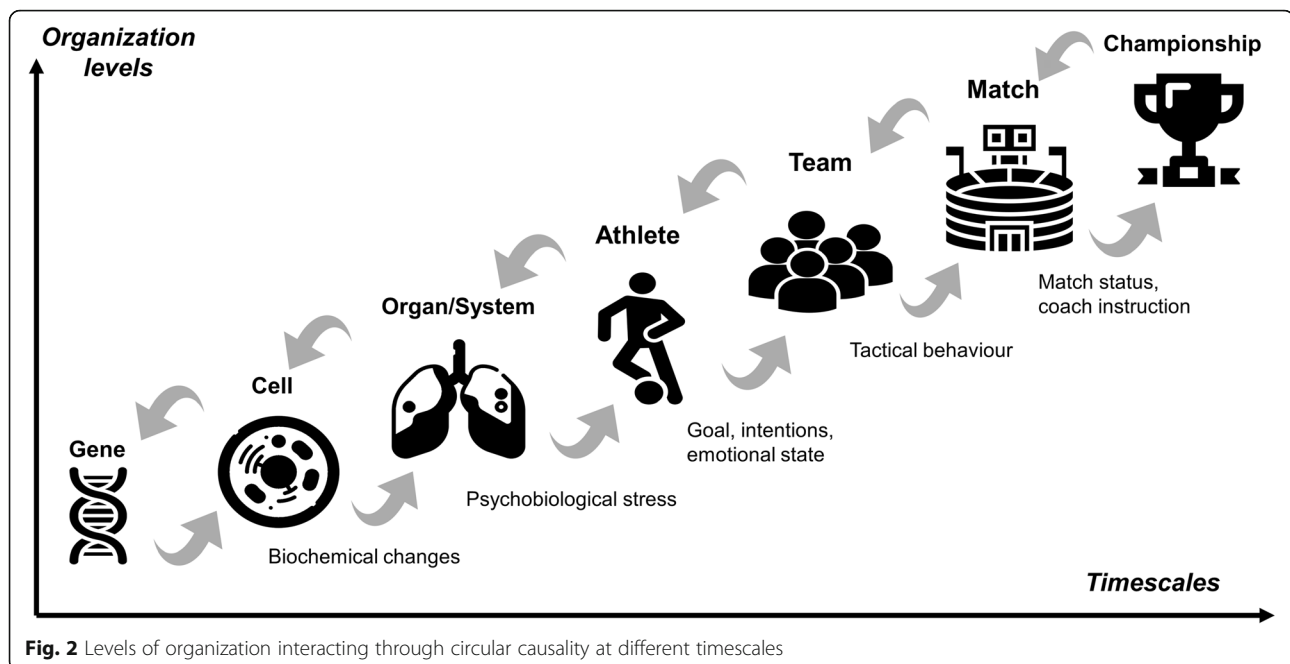
the performer's perceived affordances. From another perspective, fixed prescriptions and programs may promote coach's inattentive blindness to surrounding emergent information [65]. In such circumstances, coaches' feedback focus is put on the results and not in the execution.

Athletes/teams and coach constitute a learning system, in which the coach is not only the manager of the training environment [50] but also a learning component. As long as training is focused on satisficing the diversity potential, training should be a co-adaptive process. The coach co-adapts, continuously adjusting the constraints to the athlete/team evolution. His or her work is mostly focused on selecting and designing the problems to be solved and providing adapted, varied, innovative, and sufficiently challenging tasks to develop the team complexification/diversification. Since actions emerge from the performer-environment system, athletes/teams must be co-designers of the training process rather than mere executors. In short, coaches constrain performers, and performers constrain coaches, which being challenged also enhance their diversity potential [66].

Updating Underexplored Aspects by the CLA

The constraints-led approach (CLA), based on Newell's model [67] and underpinned by the ecological dynamics theory and the principles of nonlinear pedagogy [68, 69], has been widely applied in motor learning and skill acquisition [17, 18, 25]. More recently, it has been also adapted to skill acquisition in achievement [70], opposition [71], and team sports [8] to enhance expertise and sport talent through representative training activities.

The CLA recommended an integrative approach of sport performance [72] and has been recently upgraded on the basis of two main characteristics of constraints: (1) they act at different nested timescales, and (2) they are circularly interdependent (bottom-up and top-down) [28, 73]. This means that organismic levels (genes, cells, tissues, organs, players, teams) are related through circular causality. In this way, it is emphasized to enlarge the skill acquisition and interpersonal coordination of the CLA, understood under the framework of the perception-action coupling (e.g., decision-making in technical and tactical behavior), to all training dimensions, including strength and conditioning, in a correlated way. Although previous authors have applied the CLA to strength and coordination [74], the property of interdependency, temporal nestedness, and circular causality of constraints acting at different timescales has yet to be implemented in integrative sport methodologies. These properties, interacting bottom-up and top-down, from social to biochemical and beyond, provide a basis to dilute the boundaries between traditional silos of sports training (e.g., technical, tactical, conditional,



psychological) and to encourage the correlated development of capabilities. For instance, as illustrated in Fig. 2, a longer timescale coach instruction (high pressing), lasting minutes, during soccer matches produces a cascade of effects on shorter timescale processes; it drastically changes team tactics (defence high up the pitch), individual goals (one versus one), strategies (force mistakes to steal the ball), actions (high intensity), emotions (fears, anxieties), and physiological stress (high anaerobic activation). These top-down constrained processes are also related bottom-up. For instance, the psychobiological stress of a single player (e.g., center-back) may change his/her individual emotions (increased anxiety of being beaten by passes into the space behind), strategies (increasing the distance from the opponent), actions (stepping back to protect the goal), changing the whole team defence actions (withdraw and defend close to the own goal), and consequently, the coach instruction. The tactical anxiety of the center-back player will not be solved through individual strength and conditioning training. A coach with a good understanding of the complexity of the game and the properties of CAS may decide how to intervene effectively. Due to the interdependence of constraints, the psychobiological stress of one player is related to other constraints acting at different timescales. Interventions at long lasting constraints (e.g., team tactics) affect shorter lasting constraints (e.g., technical actions). For instance, instead of recommending strength and conditioning to reduce the physiological stress of the player, or recommend psychological training to reduce his/her fear, the coach may recommend further development of team defence

synergies and/or stimulating the cover play of the goal keeper to compensate faster the overloading of individual players. This type of intervention further develops team synergies and may help the center-back to feel safer. Coaches' competence is not simply based on knowing many recipes to respond to concrete problems but on understanding the principles that may help to decide and intervene effectively in each specific context. Complex problems cannot always be solved by simple solutions.

The idea of the nested organization of constraints is fundamental for integrative training methodologies. Independently of its origin (social, physiological, biochemical, psychological, biomechanical, etc.), constraints are related among them through timescales. This means that when the social (team) coordination is constrained, all other levels down (dyadic, interlimb, intermuscular, intramuscular, metabolic, etc.) are also constrained in a correlated way. In short, it is not a requirement to separately train endurance, strength capabilities, or motor skills in an isolated way. Through representative and contextually based tasks, such conditional capabilities and skills are already trained and developed in a correlated way. Although the previously mentioned levels and scales (social, psychological, physiological) are taken into account as environmental and personal constraints within CLA, their properties of interdependence, temporal nestedness, and circular causality have been neither hypothesized, nor elaborated in detail until now. Thus, it is not simply a problem of focusing on an enlarged spectrum of constraints but emphasizing the

practical significance of their *interdependent properties, temporal nestedness, and circular causation*. This highly important ontology of constraints and its practical implications on connecting conditioning dimensions (development of strength, endurance, etc.) was, until now, not addressed within the framework of the CLA.

A different understanding of tasks and task constraints as they are conceived by the CLA has been also introduced. They are understood as systemic properties emerging from the organism-environment interaction that do not exist without performers' intentions [28]. Due to the relation of performer's intentions/goals, and the interdependence of such goals with longer-term personal constraints (personal values, motivation, fears) through circular causality [28], an effective selection of task constraints cannot ignore the motivation degree of performer's intentions. Performer's intentions are more stable when they are correlated with personal and social values, i.e., more stable constraints changing at longer time-scales. Although CLA proposes affective learning designs [75], it does not refer to their circular interdependence with intentions and their mutual stabilizing role. The same task, performed simply with the intention of satisfying the coaches' instructions, as opposed to a task performed with intrinsic motivation, may exert different effects on athletes/teams learning, conditioning, and creativity.

The increase of the diversity potential of athletes/teams, as a main training goal, is achieved through the individual/collective exploration and discovery of functional solutions through challenging constraints. But what it is meant by challenging constraints? In this context, challenging constraints is representative of sufficiently diverse/unpredictable environments capable of developing new synergies in teams/athletes. The degree of sufficiency can be defined and modified in situ for each task. Such new synergies promote new task constraints, and through circular causality, the continuous complexification of the performer-environment system leading to the dynamic conception of sport, as illustrated in Table 1. Such dynamic, highly individualized, and self-organizing processes cannot be pre-programmed, nor promoted, through repetitive contexts. As evident from recent publications, CLA proposes that task constraints should be representative of those experienced within a competitive performance environment, i.e., what are called *representative learning designs* [1, 62, 70, 76]. Thus, it seems crucial to emphasize the diversity of task constraints and not only their representativeness. In relation to the development of the sport discipline as a whole, this representativeness itself is a dynamical or

changing property. Clear examples can be found in the evolution of game dynamics in team sports like soccer, basketball, or volleyball and the development of running strategies in track and field.

Integrating Prevention and Performance Training

Sport methodologies usually distinguish between injury resilience and performance training. This is a relevant topic because, even in sports with extensive resources (e.g., soccer), previous authors have found evidence of ineffective practices [77]. Accordingly, despite focussed prevention training, injury rates are not necessarily reduced [78]. Previously, researchers interviewed 44 professional teams about their injury prevention strategies. Almost unanimously the interviewees rated eccentric exercise as the most effective modality to prevent injuries [13]. Yet, as already suggested, looking for a simple and easy answer to a complex problem remains a common mistake in sports training contexts [79]. The assumption, held by many practitioners, that doing, for example, three series of ten repetitions twice a week, represents a meaningful injury reduction strategy illustrates the simplistic, reductionist view of injury prevention.

Although a direct relation of injury prevention, or risk mitigation, with training methodologies is difficult to establish [75], some authors have found an association between injury rates and training and coaching styles [80]. These are some of the main benefits that complex approaches can bring to the safety and wellbeing of performers seeking to integrate prevention and performance training:

- Base training methodologies on updated scientific theoretical assumptions, not merely on experiential or pseudoscientific proposals. Performers are complex, nonlinear dynamic systems, and sports are dynamic entities. This improved understanding facilitates an updated and conceptually valid lens through which to devise effective targeting the comprehensive care of athletes.
- Methodological criteria should adapt to the intrinsic dynamics of performers and the environmental context, thereby avoiding the imposition of de-contextualized training programs that may increase stress and injury risk [81].
- The coupling between the performers' intrinsic dynamics and the proposed task dynamics enhances the coordination and efficacy of the learning process [45].
- Holistic workloads, avoiding fragmentation, may increase the efficiency of the training process and avoid overuse and overloading.

- Representative tasks improve coordination and perception-action coupling.
- The goal of complexification and diversification, in contrast with the maximization of attributes, avoids excessively monotonous repetitions and overuse.
- The principle of sufficing diversity avoids the application of excessive training workloads and prevents overtraining and injuries.
- The role of performers as training co-designers, not mere executors, may enhance injury prevention [82].
- Being challenged, coaches co-adapt [50, 83], increasing their diversity potential and resources.
- As there are no fixed performance attributes or prototypes and the diversity potential can be developed in many different ways (degeneracy property), overuse and overloading become unnecessary.
- Synergies can adapt, making compensatory reconfigurations at multiple levels, thereby avoiding premature fatigue and overloading [32, 83, 84].
- A variety of challenging constraints improves psycho-emotional factors (e.g., motivation, joy, well-being and adherence) and the health status of performers [85].
- The correlatedness and nestedness of constraints serve to improve training efficiency and enhance the recovery [28].
- The improvement of decision-making and the development of performer-environment couplings prevent contact injuries [86].

Conclusion

Experiential and scientific knowledge, relating to sports training methodologies, has been historically influenced by reductionist models. Based on complex systems science and theories of biological evolution, we provide a systematization and update of theoretical and methodological principles to transform the understanding of the sports training process. This contribution is not another methodology; it simply seeks to promote the critical thinking of scientists, coaches, and practitioners to help them update or create safer and efficient interventions. Coaches and practitioners usually search for practical recipes, but the only recipe emerging from complex systems principles is that there are no fixed recipes. Functional methodologies and interventions in one context can be dysfunctional in another, and contexts are always unrepeatable and inevitably unique. Instead of focusing on practical recipes, the focus is put on understanding the systems (athletes/teams) properties and the principles that rule their interactions with the environment, keeping in mind the main aim of the process: developing the diversity/unpredictability potential of athletes/teams, that is, synergizing the system. As athletes/teams are

conceived as CAS interacting nonlinearly with their environment, synergizing is best achieved through continuously modulating challenging and meaningful constraints. As task constraints emerge from personal (goals) and a subset of environmental constraints, athletes'/teams' values and goals cannot be ignored. Exposure to challenging and meaningful contexts pushes the exploration and discovery of new synergies, promotes a co-adaptive process between coaches and performers, and transforms sports in dynamic entities.

The properties of interdependence, temporally nested organization, and circular causality of constraints can be used to satisfy integrative training purposes. By manipulating constraints at team level, a cascade of interdependent individual constraints acting at many levels (cognitive, emotional, systemic, organic, cellular, genetic) occurs in a correlated way. The intervention on slow changing constraints (e.g., values system) guarantees more stable effects than the intervention at faster changing constraints (e.g., motivation). Taking into account the circular causality among the temporarily nested constraints, it is possible to integrate not only bottom-up but also top-down at all levels of performance (including physiological and conditional). This integration, transferable to other fields, suggests a drastic break with the classical reductionism of sports training and presents fertile research opportunities for the future.

Acknowledgements

To Tony Griffin and Miriam Guerra for editing the manuscript.

Authors' Contributions

R.P., N.B., R.H., C.T., A.R., and J.K. conceived the paper and jointly drafted and reviewed the content. The authors approved the final version and agree to be accountable for all aspects of the work.

Authors' Information

Non applicable

Funding

No sources of funding were used to assist in the preparation of this article.

Availability of Data and Materials

Not applicable

Ethics Approval and Consent to Participate

Not applicable

Consent for Publication

Not applicable

Competing Interests

The authors, Natàlia Balagué, Robert Hristovski, Rafel Pol, Carlota Torrens, Angel Ric, and John Kiely, declare that they have no competing interests.

Author details

¹Real Federación Española de Fútbol (Spain), Complex Systems in Sport Research Group, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), University of Lleida (UdL), Complex de la Caparrella, s/n, 25192 Lleida, Spain.

²Complex Systems in Sport Research Group, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), University of Barcelona (UB), Av. de l'Estadi, 12-22, 08038 Barcelona, Spain. ³FC Barcelona, Barcelona (Spain), Complex Systems in Sport Research Group, Institut Nacional d'Educació Física de

Catalunya (INEFC), University of Lleida (UdL), Complex de la Caparrella, s/n, 25192 Lleida, Spain. ⁴Complex Systems in Sport Research Group, Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), University of Lleida (UdL), Complex de la Caparrella, s/n, 25192 Lleida, Spain. ⁵Institute of Coaching and Performance, School of Sport and Wellbeing, University of Central Lancashire, Preston PR1 2HE, UK. ⁶Complex Systems in Sport Research Group, Faculty of Physical Education, Sport and Health, Ss. Cyril and Methodius University, Dimche Mirchev, 1000, Skopje, North Macedonia.

Received: 18 September 2019 Accepted: 25 June 2020

Published online: 13 July 2020

References

- Renshaw I, Davids K, Newcombe D, Roberts W. The constraints-led approach: principles for sports coaching and practice design. London: Routledge; 2019.
- Kiely J. Periodization theory: confronting an inconvenient truth. *Sport Med - Open* [Internet]. 2018;48:753–764. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0823-y>.
- Stoszowski J, Collins D. Sources, topics and use of knowledge by coaches. *J Sport Sci*. 2015;34:1–9.
- Fullagar HHK, McCall A, Impellizzeri FM, Favero T, Coutts AJ. The translation of sport science research to the field: a current opinion and overview on the perceptions of practitioners, researchers and coaches. *Sport Med* [Internet]. 2019; Available from: <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01139-0>.
- Bailey RP, Madigan DJ, Cope E, Nicholls AR. The prevalence of pseudoscientific ideas and neuromyths among sports coaches. *Front Psychol* [Internet]. 2018;9: 641 Available from: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2018.00641>.
- Balagué N, Pol R, Guerrero I. Science or pseudoscience of physical activity and sport? *Apunt Educ Física i Esports*. 2019;129–36.
- Bradley P, Ade J. Are current physical match performance metrics in elite soccer fit for purpose or is the adoption of an integrated approach needed? *Int J Sports Physiol Perform*. 2018;13:656–64.
- Correia V, Carvalho J, Araújo D, Pereira E, Davids K. Principles of nonlinear pedagogy in sport practice. *Phys Educ Sport Pedagog* [Internet]. 2019;24: 117–32. Available from: <https://doi.org/10.1080/17408989.2018.1552673>.
- Butterfield T. Eccentric exercise in vivo: strain-induced muscle damage and adaptation in a stable system. *Exerc Sport Sci Rev*. 2010;38:51–60.
- McCall A, Carling C, Davison M, Nedelec M, Le Gall F, Berthoin S, et al. Injury risk factors, screening tests and preventative strategies: a systematic review of the evidence that underpins the perceptions and practices of 44 football (soccer) teams from various premier leagues. *Br J Sports Med* [Internet]. 2015;49:583–9 Available from: <http://bjsm.bmj.com/content/49/9/583.full>.
- Hibbert O, Grant A, Beers A. A systematic review of the effectiveness of eccentric strength training in the prevention of hamstring muscle strains in otherwise healthy individuals. *North Am J Sport Phys Ther*. 2008;3:67–81.
- Goode AP, Reiman MP, Harris L, Delisa L, Kauffman A, Beltramo D, et al. Eccentric training for prevention of hamstring injuries may depend on intervention compliance: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2015;49:349–56.
- McCall A, Carling C, Nedelec M, Davison M, Le Gall F, Berthoin S, et al. Risk factors, testing and preventative strategies for non-contact injuries in professional football: current perceptions and practices of 44 teams from various premier leagues. *Br J Sports Med*. 2014;48:1352–7.
- Mujica I. Quantification of training and competition loads in endurance sports: methods and applications. *Int J Sports Physiol Perform*. 2017;12: S29–217.
- Borresen J, Lambert ML. The quantification of training load, the training response and the effect on performance. *Sport Med*. 2009;39:779–95.
- Berthelot G, Sedeaud A, Marck A, Marc A. Has Athletic Performance Reached its Peak? *Sport Med*. 2015;45:1263–71.
- Davids K, Button C, Bennett SJ. Dynamics of skill acquisition: a constraints-led approach. Champaign, IL: Human Kinetics; 2008.
- Renshaw I, Davids K, Savelsbergh GJP. Motor learning in practice: a constraints-led approach. London: Routledge; 2010.
- Pross A. What is life?: How chemistry becomes biology. Oxford: Oxford University Press; 2016.
- Bar-Yam Y. Complex systems insights to building effective teams. *Int J Comput Sci Sport*. 2003;2:8–15.
- Davids K, Araújo D, Seifert L, Orth D. Expert performance in sport: an ecological dynamics perspective. Routledge Handb Sport Expert. London: Routledge; 2015. p. 156–70.
- Passos P, Davids K, Araújo D, Paz N, Minguéns J, Mendes J. Networks as a novel tool for studying team ball sports as complex social systems. *J Sci Med Sport* [Internet]. 2011;14:170–6. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2010.10.459>.
- McLean S, Salmon PM, Gorman AD, Read GJM, Solomon C. What's in a game? A systems approach to enhancing performance analysis in football. *PLoS One*. 2017;12:e0172565.
- Torrents C, Balagué N, Ric A, Hristovski R. The motor creativity paradox: constraining to release degrees of freedom. *Psychol Aesthet Creat Arts*. 2020. <https://doi.org/10.1037/aca0000291>.
- Handford C, Davids K, Bennett S, Button C. Skill acquisition in sport: some applications of an evolving practice ecology. *J Sports Sci*. 1997;15:621–40.
- Searle J. Cognitive science and the computer metaphor. In: Göransson B, Florin M, editors. *Artificial Intell Cult Lang Educ Work*. London: Springer; 1990.
- Araújo D, Davids K. Team synergies in sport: theory and measures. *Front Psychol* [Internet]. 2016;7:1449. Available from: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2016.01449>.
- Balagué N, Pol R, Torrents C, Ric A, Hristovski R. On the relatedness and nestedness of constraints. *Sport Med - Open* [Internet]. 2019;5:6. Available from: <https://doi.org/10.1186/s40798-019-0178-z>.
- Riley M, Richardson M, Shockley K, Ramenzoni V. Interpersonal synergies. *Front Psychol* [Internet]. 2011;2:38. Available from: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2011.00038>.
- Kelso JAS. Principles of coordination: synergies of synergies! *Complex Syst Sport Int Congr Link Theory Pract*. 2017. p. 13.
- Latash M. Human movements: synergies, stability, and agility. Biomech Anthr Syst. Cham: Springer; 2019. p. 135–54.
- Balagué N, González J, Javierre C, Hristovski R, Aragonés D, Álamo J, et al. Cardiorespiratory coordination after training and detraining. A principal component analysis approach. *Front Physiol*. 2016;7:35.
- Balagué N, Hristovski R, García S, Aragonés D, Razon S, Tenenbaum G. Intentional thought dynamics during exercise performed until volitional exhaustion. *J Sports Sci*. 2015;33:48–57.
- Kelso JAS. Synergies: atoms of brain and behavior. Prog Mot Control. Boston: Springer; 2009. p. 83–91.
- Haken H. Synergetics: an approach to self-organization. In: Yates FE, editor. *Self-organizing Syst Emerg order*. New York: Plenum Press; 1987. p. 417–34.
- Edelman GM, Gally JA. Degeneracy and complexity in biological systems. *Proc Natl Acad Sci*. 2001;98:13763–8.
- Bovier A, Den Hollander F. Metastability: a potential-theoretic approach. New York: Springer; 2016.
- Hristovski R. Unpredictability in competitive environments. In: Torrents C, Passos P, Cos F, editors. *Complex Syst Sport Int Congr Link Theory Pract*. Frontiers; 2017. p. 9–12.
- Ramos A, Coutinho P, Silva P, Davids K, Mesquita I. How players exploit variability and regularity of game actions in female volleyball teams. *Eur J Sport Sci*. 2017;17:473–81.
- Ric A, Torrents C, Gonçalves B, Sampaio J, Hristovski R. Soft-assembled multilevel dynamics of tactical behaviors in soccer. *Front Psychol*. 2016;7:1513.
- Torrents C, Ric A, Hristovski R, Torres-Ronda L, Vicente E, Sampaio J. Emergence of exploratory, technical and tactical behavior in small-sided soccer games when manipulating the number of teammates and opponents. *PLoS One*. 2016;11:1–15.
- Hristovski R, Balagué N, Schöllhorn W. Basic notions in the science of complex systems and nonlinear dynamics. In: Davids K, Hristovski R, Araújo D, Balagué N, Button C, Passos P, editors. *Complex Syst Sport*. London: Routledge; 2014. p. 3–17.
- Duarte R, Araújo D, Correia V, Davids K, Marques P, Richardson MJ. Competing together: assessing the dynamics of team–team and player–team synchrony in professional association football. *Hum Mov Sci* [Internet]. 2013;32:555–66. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167945713000262>.
- Silva P, Garganta J, Araújo D, Davids K, Aguiar P. Shared knowledge or shared affordances? Insights from an ecological dynamics approach to team coordination in sports. *Sport Med*. 2013;43:765–72.
- Kelso JAS. Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior. Cambridge: MIT press; 1995.

46. Shannon C, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana, IL: University of Illinois Press; 1949.
47. Ashby WR. An introduction to cybernetics. London: Chapman & Hall; 1956.
48. Simon HA. Rational choice and the structure of the environment. *Psychol Rev.* 1956;63:129–38.
49. Silva P, Duarte R, Esteves P, Travassos B, Vilar L. Application of entropy measures to analysis of performance in team sports. *Int J Perform Anal Sport* [Internet]. 2016;16:753–68. Available from: <https://doi.org/10.1080/24748668.2016.11868921>.
50. Orth D, van der Kamp J, Button C. Learning to be adaptive as a distributed process across the coach–athlete system: situating the coach in the constraints-led approach. *Phys Educ Sport Pedagog* [Internet]. 2019;24:146–61. Available from: <https://doi.org/10.1080/17408989.2018.1557132>.
51. Liu H, Gómez M, Gonçalves B, Sampaio J. Technical performance and match-to-match variation in elite football teams. 2016;34:509–518.
52. Lago C. The influence of match location, quality of opposition, and match status on possession strategies in professional association football. *J Sport Sci.* 2009;27:1463–9.
53. Gregson W, Drust B, Atkinson G, Salvo VD. Match-to-match variability of high-speed activities in premier league soccer. *Int J Sports Med.* 2010;31:237–42.
54. Haugen T, Seiler S. Physical and physiological testing of soccer players: why, what and how should we measure? *Sports Science.* 2015;19:10–26.
55. Duarte R, Araújo D, Correia V, Davids K. Sports teams as superorganisms. *Sport Med.* Springer. 2012;42:633–42.
56. Ric A, Hristovski R, Gonçalves B, Torres L, Sampaio J, Torrents C. Timescales for exploratory tactical behaviour in football small-sided games. *J Sports Sci* [Internet]. 2016;34:1723–30. Available from: <https://doi.org/10.1080/02640414.2015.1136068>.
57. Reiter-Palmon R. Team creativity and innovation. Oxford: Oxford University Press; 2017.
58. Burke CS, Stagl KC, Salas E, Pierce L, Kendall D. Understanding team adaptation: a conceptual analysis and model. *J Appl Psychol.* 2006;91:1189.
59. Ric A, Torrents C, Gonçalves B, Torres-Ronda L, Sampaio J, Hristovski R. Dynamics of tactical behaviour in association football when manipulating players' space of interaction. *PLoS One.* 2017;12(7):e0180773.
60. Seifert L, Wattebled L, Herault R, Poizat G, Adé D, Gal-Petitfaux N, et al. Neurobiological degeneracy and affordance perception support functional intra-individual variability of inter-limb coordination during ice climbing. *PLoS One.* 2014;9:e89865.
61. Pinder R, Davids K, Renshaw I, Araújo D. Representative learning design and functionality of research and practice in sport. *J Sport Exerc Psychol.* 2011;33:146–55.
62. Passos P, Milho J, Button C. Quantifying synergies in two-versus-one situations in team sports: an example from Rugby Union. *Behav Res Methods. Behavior Research Methods.* 2018;50:620–9.
63. López-Felipe MA, Davis TJ, Frank TD, Dixon JA. A cluster phase analysis for collective behavior in team sports. *Hum Mov Sci.* 2018;59:96–111.
64. Varlet M, Richardson MJ. What would be Usain Bolt's 100-meter sprint world record without Tyson Gay? Unintentional interpersonal synchronization between the two sprinters. *J Exp Psychol Hum Percept Perform.* 2015;41(1):36–41.
65. Memmert D, Furler P. "I Spy with My Little Eye!": breadth of attention, inattentive blindness, and tactical decision making in team sports. *J Sport Exerc Psychol.* 2007;29:365–81.
66. Hristovski R. A constraints-based intervention in boxing. In: I. Renshaw, K. Davids GS, editor. *Mot Learn Pract a constraints-led approach*. London: Routledge; 2010. p. 211–20.
67. Newell KM. Constraints on the development of coordination. *Mot Dev Child Asp Coord Control.* 1986;34:341–60.
68. Araujo D, Davids K, Hristovski R. The ecological dynamics of decision making in sport. *Psychol Sport Exerc.* 2006;7:653–76.
69. Chow Y, Davids K, Hristovski R, Araújo D, Passos P. Nonlinear pedagogy: learning design for self-organizing neurobiological systems. *New Ideas Psychol.* 2011;29:189–200.
70. Seifert L, Orth D, Button C, Brymer E, Davids K. An ecological dynamics framework for the acquisition of perceptual–motor skills in climbing. *Extrem Sport Med. Cham: Springer;* 2017. p. 365–82.
71. Carvalho J, Araújo D, Travassos B, Esteves P, Pessanha L, Pereira F, et al. Dynamics of players' relative positioning during baseline rallies in tennis. *J Sports Sci* [Internet]. 2013;31:1596–605. Available from: <https://doi.org/10.1080/02640414.2013.792944>.
72. Glazier P. Towards a grand unified theory of sports performance. *Hum Mov Sci.* 2017;56:139–56.
73. Hristovski R, Aceski A, Balague N, Seifert L, Tufekcivski A, Cecilia A. Structure and dynamics of European sports science textual contents: analysis of ECSS abstracts (1996–2014). *Eur J Sport Sci.* 2016;17(1):19–29.
74. Bosch F, Cook K. Strength training and coordination: an integrative approach. Rotterdam: 2010 Publishers; 2015.
75. Headrick J, Renshaw I, Davids K, Pinder RA, Araújo D. The dynamics of expertise acquisition in sport: the role of affective learning design. *Psychol Sport Exerc.* 2015;16:83–90.
76. Woods CT, McKeown I, Shuttleworth RJ, Davids K, Robertson S. Training programme designs in professional team sport: an ecological dynamics exemplar. *Hum Mov Sci.* 2019;66:318–26.
77. Fanchini M, Steendahl IB, Impellizzeri FM, Pruna R, Dupont G, Coutts AJ, McCall A. Exercise-based strategies to prevent muscle injury in elite footballers: a systematic review and best evidence synthesis. *Sport Med* [Internet]. 2020; Available from: <https://doi.org/10.1007/s40279-020-01282-z>.
78. Ekstrand J, Waldén M, Häggglund M. Hamstring injuries have increased by 4% annually in men's professional football, since 2001: a 13-year longitudinal analysis of the UEFA Elite Club injury study. *Br J Sports Med* [Internet]. 2016;50:731–7. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26746908>.
79. Sturmberg J, Topolski S. For every complex problem, there is an answer that is clear, simple and wrong: and other aphorisms about medical statistical fallacies. *J Eval Clin Pract.* 2014;20:1017–25.
80. Ekstrand J, Lundqvist D, Lagerbäck L, Vouillamoz M, Papadimitiou N, Karlsson J. Is there a correlation between coaches' leadership styles and injuries in elite football teams? A study of 36 elite teams in 17 countries. *Br J Sports Med.* 2018;52(8):527–31.
81. Ekstrand J, Gillquist J, Möller M, Oberg B, Liljedahl S-O. Incidence of soccer injuries and their relation to training and team success. *Am J Sports Med.* 1983;11:63–7.
82. Pol R, Hristovski R, Medina D, Balague N. From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review. *Br J Sports Med.* 2018;0:1–8.
83. Hristovski R, Venskaityte E, Vainoras A, Balagué N, Vazquez P. Constraints-controlled metastable dynamics of exercise-induced psychobiological adaptation. *Medicina (B Aires).* 2010;46:447–53.
84. Vázquez P, Hristovski R, Balagué N. The path to exhaustion: time-variability properties of coordinative variables during continuous exercise. *Front Physiol.* 2016;7:37.
85. Hutto DD, Kirchhoff MD, Renshaw I. Emotions on the playing field. In: Capuccio M, editor. *Handb Embodied Cogn Sport Psychol*. Cambridge: MIT press; 2019. p. 23–46.
86. Leventer L, Dicks M, Duarte R, Davids K, Araújo D. Emergence of contact injuries in invasion team sports: an ecological dynamics rationale. *Sport Med.* 2015;45:153–9.

Publisher's Note

Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Submit your manuscript to a SpringerOpen® journal and benefit from:

- Convenient online submission
- Rigorous peer review
- Open access: articles freely available online
- High visibility within the field
- Retaining the copyright to your article

Submit your next manuscript at ► [springeropen.com](https://www.springeropen.com)

**3.4 From microscopic to macroscopic sports injuries.
Applying the complex dynamic systems approach to sports
medicine: a narrative review**

From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review

Rafel Pol,¹ Robert Hristovski,² Daniel Medina,³ Natalia Balague⁴

¹Futbol Club Barcelona. Complex Systems in Sport Research Group, INEFC, Universitat de Lleida (UdL), Barcelona, Spain

²Complex Systems in Sport Research Group, Faculty of Physical Education, Sport and Health, Saints Cyril and Methodius University, Skopje, Macedonia (the former Yugoslav Republic of Macedonia)

³Futbol Club Barcelona. Complex Systems in Sport Research Group, Barcelona, Spain

⁴Complex Systems in Sport Research Group, INEFC, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, Spain

Correspondence to

Dr Natalia Balague, Complex Systems in Sport Research Group, INEFC, Universitat de Barcelona (UB), Barcelona, Spain; nataliabalague@gmail.com

Accepted 30 March 2018
Published Online First
19 April 2018

ABSTRACT

A better understanding of how sports injuries occur in order to improve their prevention is needed for medical, economic, scientific and sports success reasons. This narrative review aims to explain the mechanisms that underlie the occurrence of sports injuries, and an innovative approach for their prevention on the basis of complex dynamic systems approach. First, we explain the multilevel organisation of living systems and how function of the musculoskeletal system may be impaired. Second, we use both, a constraints approach and a connectivity hypothesis to explain why and how the susceptibility to sports injuries may suddenly increase. Constraints acting at multiple levels and timescales replace the static and linear concept of risk factors, and the connectivity hypothesis brings an understanding of how the accumulation of microinjuries creates a macroscopic non-linear effect, that is, how a common motor action may trigger a severe injury. Finally, a recap of practical examples and challenges for the future illustrates how the complex dynamic systems standpoint, changing the way of thinking about sports injuries, offers innovative ideas for improving sports injury prevention.

INTRODUCTION

Sports injuries can be thought of as the loss of body function or structural integrity that occurs instantly through sports activities.¹ There is a strong correlation between sports injuries and team success,² as well as serious financial implications, for example, over \$1 billion for Major League Baseball teams in 2014,³ and £177 million last season for Premier League clubs.⁴ The growing number of sports practitioners and the need to provide adequate recommendations for safe practices underpins the great interest in sports injury prevention during the last decade.^{5,6}

Existing multifactorial aetiology models reflect the interaction of risk factors in the path to injury.^{7–10} These models allow for the possibility that both internal (eg, age, sex and body composition) and external risk factors (eg, rules, equipment and environment) render athletes susceptible to injury. However, as the risk factors themselves are insufficient to cause injury, some inciting event (eg, motor action, playing situation or an opponent's behaviour) is considered necessary to trigger the causal pathway.⁸ Meeuwisse *et al*⁹ suggested that sports injury risk factors and the susceptibility of an athlete change over time.⁹ For example, training load has a dynamic recursive influence on sports injury risk. The same workload may produce a

positive training effect (make the athlete perform better and potentially protect against injury by improving conditioning) or under different conditions, increase risk of an injury or, in some cases, cause an injury directly. As risk factors may interact among themselves and change the resulting emergent behaviour, some authors propose the identification of risk factor interactions to detect injury patterns in sport.¹⁰

Since many risk factors at play (eg, lack of sleep, nutrition status, training surface, musculoskeletal elements such as joint range of motion or tissue recovery state in addition to training load), and the athlete's susceptibility to injuries changes dynamically, we propose, in agreement with some of the experts in the field,¹¹ to study sports injuries through a complex dynamic systems approach.

Specifically, in this narrative review we offer concrete explanations of non-linear, that is, non-proportional effects that arise as a consequence of interaction between risk factors on different timescales. While linear models can explain sports injuries where the cause is proportional to the effect, for example, a hard blow in the quadriceps produces a severe muscle injury, non-linear models are able to explain proportional and non-proportional cause-effect relationships because they are more general (linearity is just a limit case of non-linearity). Dynamic systems theory (DST) is an area of mathematics that offers useful principles, concepts and tools for understanding and modelling complex, dynamic and non-linear scenarios of the kind that occur in sport.¹²

'Dynamic systems theory (DST) is an area of mathematics that offers useful principles, concepts and tools for understanding and modelling complex, dynamic and non-linear scenarios of the kind that occur in sport.'

DST concepts and principles have been applied to different types of sport-related phenomena (eg, fatigue, decision making or game analysis) and at different biological levels, from molecular to social.¹³ Figure 1 shows the shared commonalities and outcomes of two apparently distinct sport-related processes: the path to exhaustion and the path to injury. Embedded in similar dynamic laws^{13,14} they can be interpreted as adaptive protective mechanisms that enforce time for recovery. On the basis of the commonalities existing among



To cite: Pol R, Hristovski R, Medina D, *et al.* *Br J Sports Med* 2019;**53**:1214–1220.

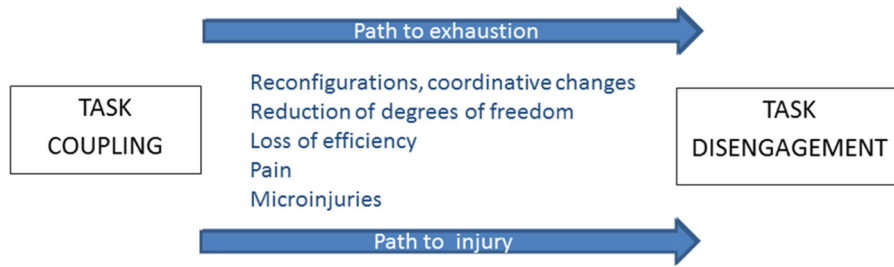


Figure 1 Common features between the path to exhaustion and the path to injury. Both processes bring about task disengagement.

biological processes, some hypotheses and examples extracted from exercise-induced fatigue and, more concretely, from the path to exhaustion investigation, are provided in this text when not available in the injuries' investigation.¹⁵

Our aim in this review is to broaden the understanding of how mathematical concepts and principles of DST¹² and complex network theory¹⁶ such as *circular causality*, *synergy*, *constraint*, *non-linear effects* and *connectivity* can apply to sports injury prevention. Specifically, we are interested in explaining the why and how of sudden increases in susceptibility to injury via the non-linear behaviour of risk factors and the connectivity hypothesis based on the percolation model.¹⁷ The paper is divided into three parts: (1) The general basis, explaining the living systems organisation and how the musculoskeletal system

(MSS) instability arises. (2) The constraints-based approach and the connectivity hypothesis, which are our two main contributions to the topic. (3) Challenges for the future.

MULTILEVEL ORGANISATION IN LIVING SYSTEMS

Motor actions are the product of the interaction between biological components (eg, molecules, cells, organs, limbs) and processes (biochemical or cellular) operating at different timescales (from milliseconds to decades) within a specific context (figure 2). Each level possesses specific properties that emerge through the interaction of individual components on the level below through a process of self-organisation.¹⁸ For instance, muscle cells contribute to form a muscle tendon unit (MTU) but

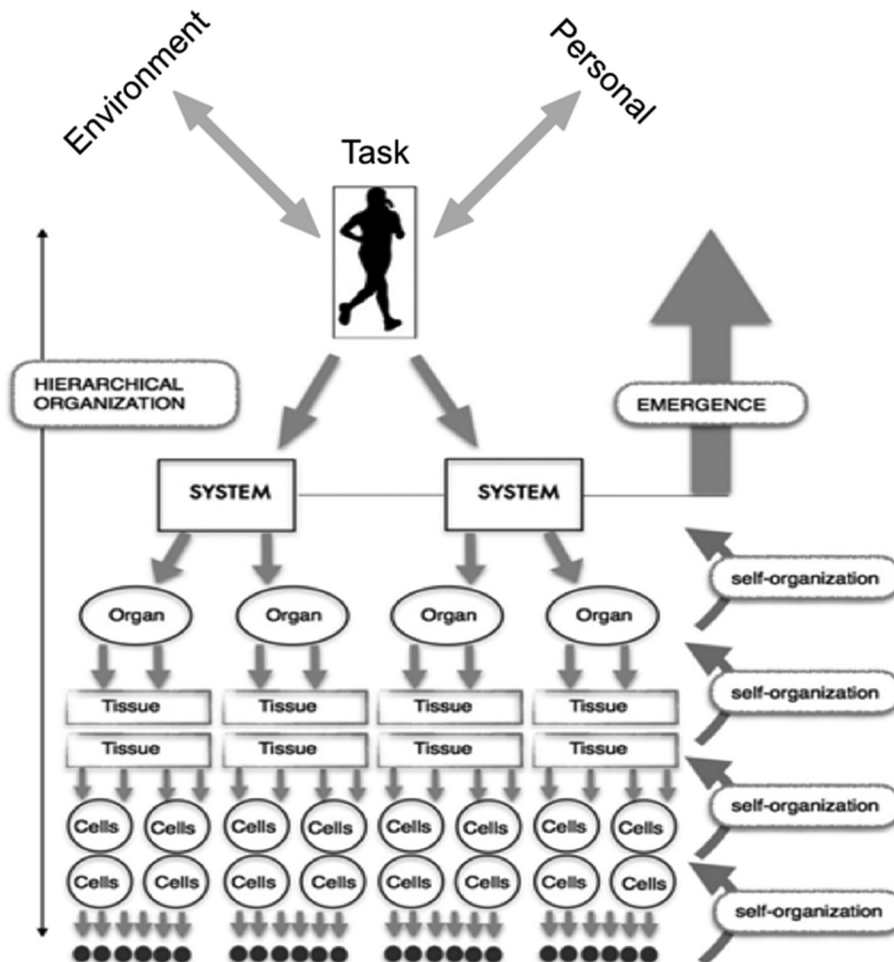


Figure 2 Multilevel organisation in living systems. Processes operating at different timescales (including molecular, organism and social levels) dynamically interact through circular causality and lead to the emergence of new components and properties through self-organisation.

the properties of the latter cannot be explained by properties of single cells.

Although it seems inadequate to establish linear, upward causality relationships among these lower and upper levels, this has been a common practice in the traditional reductionist approaches to sports injuries. For instance, a linear causal relationship would suggest that muscle strains result from excessive tensile forces. This linear relationship has been widely accepted for decades, even though *in vivo* muscle disruption could not be extrapolated from the sarcomere disruption seen in single fibres.¹⁹ A representative example of this approach is eccentric exercise, which is rated as the most important type of exercise in injury prevention,²⁰ even if it has a low level of evidence and presents some potential adverse effects.^{21–24}

An important DST principle to consider in this multilevel organisation is that the functionality of each level is ensured through *circular causality*.²⁵ The cooperative behaviour of the components below form the level above and the level above governs the behaviour of the components below. That is, microcomponents (eg, muscle cells) form mesocomponents (eg, motor units) and macrocomponents (eg, MTU) which subsequently govern the behaviour of the components below them. Functionality is attained through a tight cooperative behaviour inside each level and among levels which interact both bottom-up and top-down.

The contextual internal and external changes produced by sports practice require continuous readjustments of these multilevel interactions. For example, it has been shown through the variability profile of coordinative kinematic variables how exercise-induced fatigue changes the cooperative behaviour of neuromuscular components.²⁶ In the next sections we will examine how continuous multilevel readjustments keep MSS functional during exercise and how the interaction with personal and environmental changes may perturb this functionality.

INSTABILITY OF MSS AND SUSCEPTIBILITY TO SPORTS INJURIES

In(stability)

In DST, *stability* is defined as the resistance to perturbations and rapid return to the system's functional state.¹² When MSS is stable, its microcomponents, mesocomponents and macrocomponents cooperate tightly and flexibly: if one component (or a set of them) is unsettled, the other components make accurate and fast adjustments to restore the functional state. By contrast, MSS *instability* is characterised by rigid and less cooperative behaviour of MSS components that respond with slow and less fine adjustments to perturbations. For instance, overuse and disuse impair MSS functionality and its neural connectivity.²⁷ Instability implies a delayed return of MSS to a functionally stable state and an infinite increase in its recovery time.

Synergy

To maintain stability in the face of perturbations, MSS self-organises spontaneously through compensatory behaviour occurring at multiple MSS levels. This behaviour is a hallmark of *synergy*. If a set of components reduce or lose their function, other components alter their contributions so that the overall function is maintained.²⁸ The adaptation to pain sensation through motor coordination changes^{29,30} and the increased variability of synergistic components to offset the reduced variability of an injured component^{31,32} are examples of MSS compensatory behaviour.

Connectivity

Defined as a spatial measure of connectedness among system components, *connectivity* is proposed here as a coordinative

variable to be considered in predicting and preventing injuries. It is hypothesised that: (1) Connectivity is the basis of stability and functionality in healthy MSS tissues. (2) *Connectivity* is also responsible for linking MSS damaged tissue (microinjuries and mesoinjuries) to produce macroinjuries, as might be the case in dystrophic calcification as a result of recurrent trauma and tendinopathy. With unconnected microinjuries the overall function of the MSS tissue can be maintained through synergetic compensations (MSS stability), but when the *connectivity* within damaged tissue increases, the MSS destabilises. In this unstable state, the addition of a single microinjury may produce a macroinjury.

As available connectivity measures have not yet been applied to the assessment of the MSS state, the variability profile of coordinative variables may be analysed to detect the stable/unstable states of MSS and its susceptibility to injuries.³³ In DST, coordinative variables integrate the organisation of the system's components into a single quantitative value. The type of variability reflects the degree of coupling among the system components and its qualitative reorganisation. Vázquez *et al*³⁴ have shown that the change in the cooperative behaviour of neuromuscular components as fatigue develops is manifested through the changes in the time variability properties of the kinematic coordinative variable. A small perturbation (eg, pain sensation or imbalance) when the neuromuscular system is unstable, that is, close to exhaustion, can suddenly provoke the task disengagement.

RISK FACTORS VERSUS CONSTRAINTS; PRINCIPLES DEFINING THE MULTILEVEL INTERACTION AMONG VARIABLES

In epidemiology, 'risk factor' is described as any attribute, characteristic or exposure of an individual that increases the likelihood of developing an injury, and it is generally treated as a static variable with proportional, that is, linear, dependencies.³⁵ By contrast, in DST, the concept of constraints or boundary conditions is used to describe dynamic entities that, interacting non-linearly at different levels and over different timescales, regulate the state (stability/instability) of coordinative variables. Furthermore, short-term changes in constraints are called perturbations. Some conceptual models of sports injuries have emphasised the dynamic interconnectedness and synergistic interactions among different risk factors.^{9–11,36} In this respect, the concept of constraint seems more suitable than that of risk factor, especially when considering a DST-based approach to sports injuries.

Newell's constraints model,³⁷ distinguishing three categories of constraints (organismic or personal, environmental and task-related), has been successfully applied to sports medicine,^{38,39} physical therapy and rehabilitation,^{40–42} physical conditioning^{43,44} and sports biomechanics,^{45,46} but only partially to sports injuries.⁴⁷ Personal constraints are related to individual characteristics (physiology, morphology, psychology).⁴⁸ Although structural personal constraints tend to remain relatively constant over several timescales (eg, anthropometric characteristics, body composition, muscle architecture and typology), functional personal constraints change at a faster rate (eg, muscle strength, mood, motivation, level of fatigue). Environmental constraints also change with time, and are external to the movement system⁴⁹ (eg, climate, terrain, turf type, equipment, sports shoes, gravitational forces, implements, referee behaviour and social pressure). Finally, task constraints, related to the task being performed, arise from the interaction between personal and

Table 1 Examples of personal, environmental and task constraints interacting at different levels and timescales. The timescale may vary: for example, anthropometric variables may change faster (eg, timescale of months) during puberty

Timescale	Constraints		
	Personal	Environmental	Task
Fraction of a second	Stretch-shortening cycle	Ball position	Perceived possibilities of action
Seconds	Attention focus	Referee decision	Opponent's actions
Minutes	Acute fatigue	Opponents tactics	Coach instruction
Hours	Goal to win the match, mood	Temperature	Strategy
Days	Motivation	Social pressure	Workload specificity
Weeks	Strength	Rank score	Training intensity
Months	Overtraining syndrome	Seasons, climate	Calendar of competitions
Years	Anthropometry	Fan's support	Sports rules

environmental constraints and can be instructional (eg, rules and instructions) or informational (eg, opponent's actions).⁴⁸

Table 1 summarises some examples of interacting constraints operating at different timescales in relation to the occurrence of sports injuries of personal, environmental and task constraints interacting at different levels and timescales.

The interaction between constraints

Constraints act at different levels and timescales,³¹ and arise anatomically and functionally from the interactions between them. Changes in two or three constraints can neutralise each other and have minimal impact on the resulting pattern of coordination due to synergistic compensation. For instance, a reduction in the strength and/or activation of the iliopsoas muscle may result in rectus femoris compensation to generate more hip flexion force.⁵⁰ By contrast, a small-scale change in one constraint can have a large-scale non-linear impact on the ensuing pattern of coordination. Consider a small increase of workload that may result in task failure or task disengagement.²⁶ Due to their interaction with collective variables, constraints are interconnected. Indeed, fatigue, strength and neuromuscular control, considered to be among the main risk factors, are highly correlated; fatigue decreases strength and impairs motor coordination,⁵¹ which, in turn, is tightly coupled to strength.⁵²

The non-linear effect of constraints

Human organisms are adaptive and fit their behaviour to emerging constraints. This adaptive behaviour exhibits dynamic non-linear properties (ie, non-proportional changes over time). The relationship between the coordinative variable and the constraints can be continuous and proportional (figure 3, upper panel) or discontinuous and non-proportional (figure 3, lower panel). In the upper panel a small/large change of the constraint brings about a small/large change in the coordinative variable. In contrast, in the lower panel, a large change in the constraint does not lead to any change in the coordinative variable (region A), but a further small change (around the dashed line) produces a large change in the coordinative variable (region B).

The behaviour of the coordinative variable in region B cannot be extrapolated from the behaviour in region A, or vice versa, because there is a functional discontinuity between the coordinative variable and the constraint, or a set of constraints. Thus, non-linear effects emerge spontaneously through self-organisation (ie, without being previously designed and/or externally imposed on the system) as a consequence of a small change in the constraint value. Small changes may be compensated for and accumulate without visible effects, before a sudden, further small change produces a qualitative reorganisation. This all-or-nothing, threshold response is typical behaviour of biological systems that cannot be captured by linear or non-linear regression procedures.¹² The activation firing threshold at the muscle cell level, and the qualitative change from asynchronous to synchronous contraction at the motor unit level, are examples of this qualitative reorganisation of MSS components. Although not yet described as a non-linear phenomenon, the literature reports that 60% of hamstring injuries in professional soccer are produced by the 'same' inciting event or action (eg, eccentric action of hamstrings during the late swing or stance phase of the sprint) which has been performed thousands of times without causing a muscle strain.⁵³

Effects of workloads at different timescales

Workloads are specific types of constraints playing antagonist effects at different timescales.^{54–57} In the short term they produce stress on MSS (inflammation, microinjuries, etc), and negatively affect performance, but in the long term they promote the regeneration of new resilient MSS structures and new motor synergies which increase workload tolerance and performance. Both adaptive responses produce changes in the MSS at different levels (from microscopic to macroscopic) and timescales (from a single exercise bout, to an entire training season). One of the consequences is the changes in MSS stability and its increased sensitivity to recovery periods.⁵⁴

Due to the antagonistic effect of workloads, MSS susceptibility to injuries may change unpredictably, especially over shorter timescales. For example, although repeat sprint training sessions improve endurance in a few weeks,⁵⁸ an additional single sprint session of the same characteristics may produce a severe hamstring strain. Interestingly, high training workloads and periods of undertraining and inactivity may increase the risk of injury.⁵⁴ In fact, rest also has different time delay effects on each biological level. While de-training effects occur relatively fast at subcellular and muscle fibre levels,⁵⁹ longer time intervals are required at cortical and subcortical levels, affecting cognitive functions, such as motivation and attention. Consequently, de-training (or decreased workload) may produce a lack of cooperation among levels, impairing motor coordination and increasing MSS susceptibility. Sports injuries arising after relatively long resting periods, such as those that occur during pre-season,⁶⁰ may thus be explained by a mismatch between the performance that the athlete tries to achieve and his/her current capabilities. The lack of cooperation among biological levels reduces the synergistic possibilities of maintaining MSS stability³⁴ and should be carefully considered when designing training programmes. According to the antagonistic effects over different timescales pointed out here, it is likely not the increase or decrease of training workloads per se that affects MSS susceptibility to injuries,⁵⁴ but rather appropriate workload provided relative to timings. Consequently, the 'control' of workload timings may regulate the state (stability/instability) of MSS connectivity and thus, its responsiveness to perturbations.

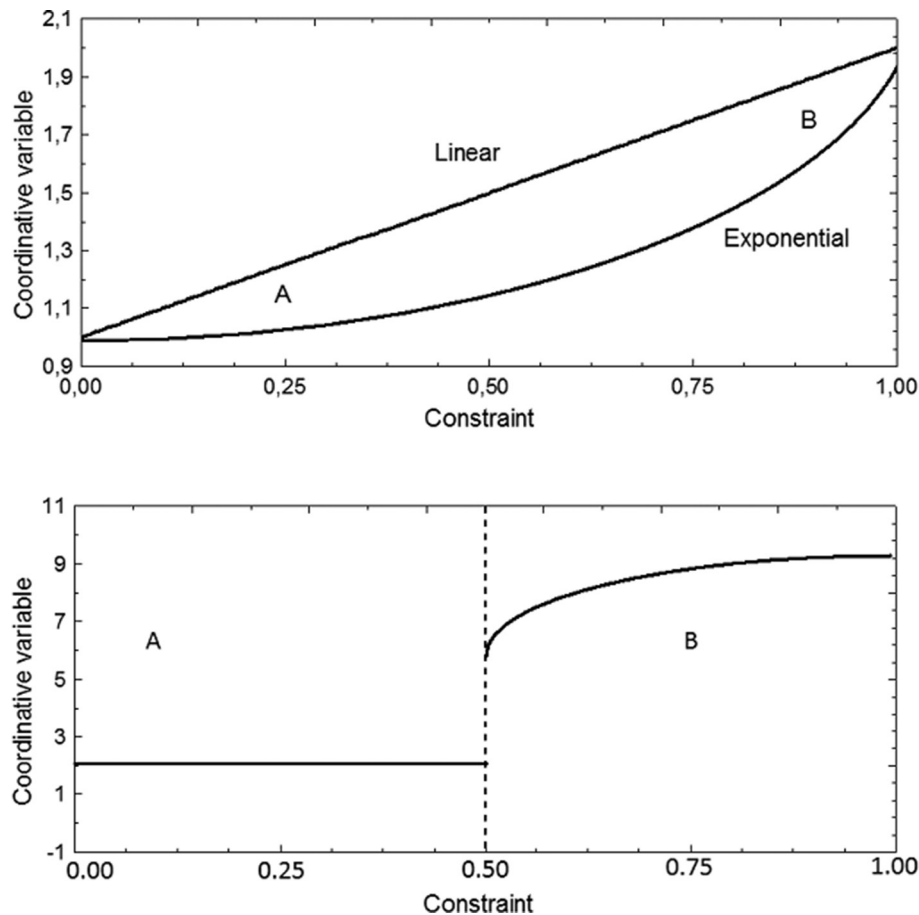


Figure 3 Proportional (upper panel) and non-proportional (lower panel) relationships between coordinative variables and constraints. In the upper panel it is possible to extrapolate the behaviour of coordinative variables in region B from the behaviour in region A, and vice versa. However, in the lower panel the behaviour in region B cannot be extrapolated from the behaviour in region A, or vice versa. The dashed line represents the 'critical' constraint value.

CONNECTIVITY: FROM MICROINJURIES TO MACROINJURIES

According to the connectivity hypothesis, the susceptibility to sports injury is defined as the responsiveness of MSS (representing the macroscopic level) to the addition of a new microinjury (representing the microscopic level), which can be produced by a small mechanical or other type of perturbation. When MSS is stable, the susceptibility is low and a large perturbation, like a large contact or force, is needed to produce a macroscopic injury. However, close to instability, MSS susceptibility to perturbations drastically increases, and the addition of a new microinjury can be sufficient to produce a macroinjury (eg, a rupture or muscle tear). Thus, the connectivity hypothesis unifies the proportional and non-proportional cause-effect relationship of injury formation as a function of MSS susceptibility.

As shown in figure 4, different sets of changing personal and environmental constraints shape the MSS state and the motor coordination during training and competition. In MSS, sites of microinjuries may be conceptualised as nodes of a large network of mechanical couplings with interacting influences. In such large networks, under certain constraints, microinjuries occur and a connected effect (mesoinjuries, macroinjuries) of the damaged tissue may emerge. The connectivity of microinjuries can be seen as an accumulative process occurring at different temporal scales and ending with a non-linear accelerating avalanche that eventually results in a macroinjury. At a short timescale, only microinjuries manifest (except for traumatic injuries) (figure 4A). However, as a small cluster of microinjuries form, the tissue

destabilises further and neighbouring cells must be recruited to compensate for its inability to produce force. Thus, an increasing number of motor units become overloaded and more susceptible to injury. As a consequence, at a larger timescale the microinjuries may connect into larger clusters, forming mesoscopic injuries (figure 4B), and at even longer timescales the mesoscopic injuries may suddenly connect and form a giant component or percolation,¹⁷ such as a rupture or muscle tear, or an overt incapacitating macroinjury (figure 4C). This means that under MSS instability an 'event' can be transformed into an 'inciting event'. Such cascading failure effects are commonplace and are also present in power grid or internet breakdowns.⁶¹

CHALLENGES FOR THE FUTURE; A COMPLEX DYNAMIC APPROACH TO SPORTS INJURIES

Training and competition workloads

As workloads interact with personal and environmental constraints at multiple timescales, they should be prescribed according to general season or mesocycle planning criteria, and according to the fast changing personal and environmental constraints. Research results have detected fluctuations of perceived effort in intervals of seconds during constant workload. These fluctuating dynamics of exercise readiness are explained by coordinative reconfigurations across the effort.⁶² A discouraging comment from the coach, a sudden change in the score or an opponent action are examples of fast-changing environmental

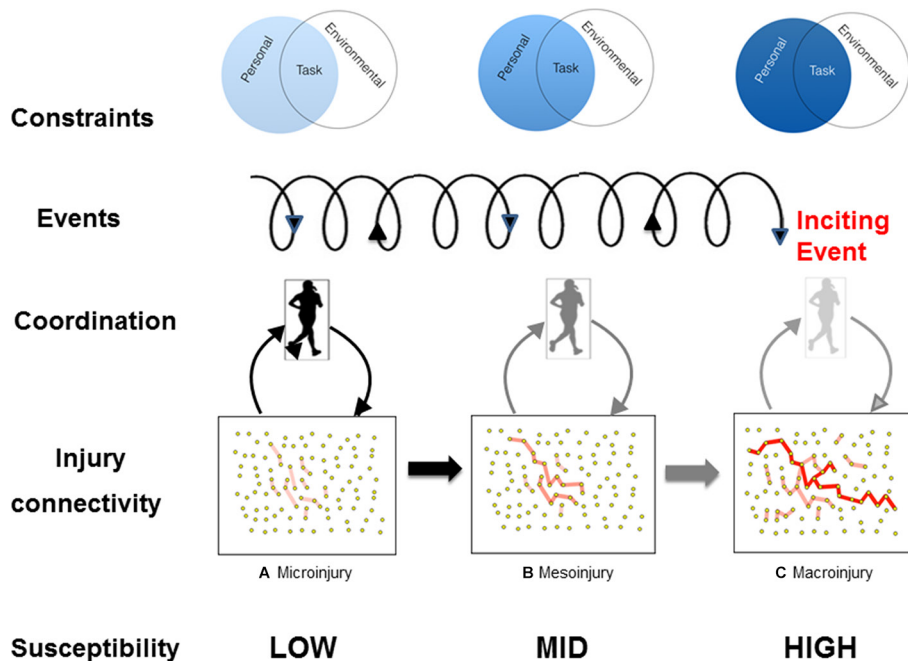


Figure 4 Recurrent dynamics of macroinjury formation based on the connectivity hypothesis. From top to bottom: the interacting personal and environmental constraints form tasks (events) that shape the athlete's motor coordination, which in turn governs musculoskeletal system (MSS) components, their connectivity and susceptibility. The left hand column represents the early stage: the events may form microinjuries (A) but MSS susceptibility is low, as it is in healthy tissue. Middle column (advanced stage): consecutive events without sufficient recovery change the personal constraints further (darker colour) and progressively alter the athlete's coordination (paler colour) accelerating the formation of microinjury clusters or mesoinjuries (B) which enhance MSS susceptibility. Right hand column (final stage): the top-down and bottom-up circular causality between the constraints, the athlete's coordination and injury-connectivity tissue properties may continue to the final inciting event which, due to the high MSS susceptibility, may produce a macroinjury under a standard manoeuvre (C). While in the early stage a large change in the constraints (personal or/and environmental) is needed to produce a macroinjury, in the final stage a small change may be sufficient.

constraints which may alter the internal workload. Injury prevention programmes could be more effective if greater responsibility over workload regulation was given to athletes themselves. The development of this responsibility should start at an early age, and so pedagogical tools should be created for this purpose.

Interoceptive awareness measurements—how do you feel?

Future research should pay special attention to developing body awareness in athletes to recognise early warning signs related to microinjuries (eg, coordinative changes or initial inflammatory responses). The understanding of the injury process explained here and the implementation of adequate subjective assessment tools with pedagogical and exploratory purposes can assist the clinician substantially. This line of research should also be underpinned by the hypothesis that education and self-regulation of emotional and physical states are crucial for the health of the athlete, and career longevity. Until specific subjective assessment tools become available, a simple question addressed to them, such as 'how do you feel?'⁶³ may provide a rich integrated information regarding MSS susceptibility.

Top-down effects on MSS susceptibility

MSS susceptibility to injuries may change as a result of bottom-up (from subcellular or cellular level to the MSS level) and top-down influences of constraints (from social and psychological levels to the MSS level), recently reported through the association found between coaches' leadership style and injury rates.⁶⁴ The effects of fear, anxiety, stress, motivation and emotional arousal on motor coordination,^{14 65 66} often disregarded in some models of

sports injury, should also be taken into account due to their long-term effects on MSS.

Dimension reduction of constraints

As constraints may drastically change MSS susceptibility to injury, the application of dimension reduction techniques to constraints acting at similar timescales seems suitable for research purposes.^{10 11} The projection of coordinative variables in such low-dimensional spaces may pave the way for better detection of the critical regions of constraints that increase MSS susceptibility to injuries.

Variability profile of coordinative variables

There is a need to develop monitoring and recording systems to detect and provide insights into the warning profiles of coordinative variables approaching the tipping point (ie, the emergence of macroinjury) in a variety of sports situations. The variability profile of motor coordination variables has been widely studied in relation to diverse pathologies including overuse injuries.^{32 39}

Assessment of MSS susceptibility to injury through connectivity measures

As MSS susceptibility does not correspond to fixed constraint constellations or fixed quantitative values, the development of new objective measures based on *connectivity properties* such as tensegrity⁶⁷ is desirable. The precise detection of the clustering characteristics (eg, centrality, mean and maximum cluster size, or preferential attachment measures) of microinjuries and mesoinjuries through developing methods such as 3D

MRI scans are recommended. The assessment of the likelihood of mesoinjuries connectivity and sudden onset of a macroinjury, seem to represent a promising direction for future research. A joint effort of experts in movement science and tissue biomechanics, physicists from the area of statistical mechanics and network theory, as well as bioinformatics and mathematical simulation computer scientists would be needed to create more workable models based on finite element method/percolation theory. In our opinion, a complementary use of inductive inferential statistical and deductive computer simulation approaches can pave the way towards more in-depth understanding and prediction of non-linear mechanisms of sports injuries.

CONCLUSION

Based on DST principles and according to the connectivity hypothesis, macroinjuries emerge as a result of instability spread at the micro, meso and macro MSS levels. We assume that MSS susceptibility to sports injuries is the result of a non-linear effect of constraints interacting dynamically at different levels and timescales. When MSS is susceptible, a small perturbation may connect previous microinjury and mesoinjury clusters, and create a macroscopic effect (macroinjury), such as a muscle tear or tendon rupture. The detection of critical regions of constraints that produce MSS instability and the assessment

of microinjury and mesoinjury clustering processes are crucial to prevent the sudden occurrence of macroinjuries. Furthermore, such diagnostic tools for prevention and prediction may help coaches and athletes to control and adapt personal, environmental and task constraints accordingly. The complex dynamic systems approach changes the way we think about sports injuries, and how clinicians, coaches and athletes might aim to investigate and incorporate the constraints perspective into their clinical reasoning and daily practice for both injury prevention and rehabilitation.

Acknowledgements The authors thank Dr Agne Slapsinskaite and Scott Epsley for their technical work and Dr Karim Khan for his kind editorial help.

Contributors RP, RH and NB contributed to the manuscript's conception and design. DM contributed to the accurate and critical revision of the manuscript as well as approval of the final version. All authors were involved in the preparation and editing of the manuscript.

Funding This study has been supported by the Institut Nacional d'Educació Física de Catalunya (INEFC), Generalitat de Catalunya.

Competing interests None declared.

Patient consent Not required.

Provenance and peer review Not commissioned; externally peer reviewed.

© Article author(s) (or their employer(s) unless otherwise stated in the text of the article) 2019. All rights reserved. No commercial use is permitted unless otherwise expressly granted.

What are the findings?

- ▶ Personal, task and environmental risk factors (constraints) interact dynamically and non-linearly at different levels and timescales to increase the susceptibility to sports injuries.
- ▶ According to the connectivity hypothesis, when the musculoskeletal system (MSS) is susceptible, a small perturbation may connect previous microinjuries and mesoinjuries, creating a macroscopic non-linear effect and accounting for why a standard manoeuvre may trigger a severe injury.
- ▶ Workloads should be prescribed according to general season or mesocycle planification criteria, and according to personal and environmental constraints that may change in very short timescales.
- ▶ New objective measures based on connectivity properties of MSS and subjective interoceptive capacities of athletes can improve injury prevention strategies.

How might it impact on clinical practice in the future?

- ▶ The detection of critical regions of constraints that increase MSS susceptibility, as well as the assessment of microinjury and mesoinjury clustering processes, is crucial to prevent the sudden emergence of a macroinjury.
- ▶ As the susceptible state of MSS does not correspond to fixed constraint constellations and fixed quantitative values, it may be assessed through the dynamics of coordinative variables such as the degree of MSS connectivity.
- ▶ Emotional and motivational constraints should particularly be taken into consideration due to their long-term effects on MSS susceptibility.
- ▶ Through self-monitoring and self-awareness training, athletes can be expected to learn to regulate their workloads and thus, collaborate in reducing the injury risk.

REFERENCES

- 1 Timpka T, Jacobsson J, Bickenbach J, et al. What is a sports injury? *Sports Med* 2014;44:423–8.
- 2 Häggglund M, Waldén M, Magnusson H, et al. Injuries affect team performance negatively in professional football: an 11-year follow-up of the UEFA Champions League injury study. *Br J Sports Med* 2013;47:738–42.
- 3 Whiteley R. Moneyball' and time to be honest about preseason screening : it is a sham making no inroads on the 1 billion dollar injury costs in baseball. 2015:1–2.
- 4 JLT. Injury time: injuries cost Premier League clubs £177M during last season, up £20M on previous year. 2017. <https://www.jltspecialty.com/media-centre/press-release/2017/june/injury-costs-for-premier-league-clubs>
- 5 Engebretsen L, Bahr R, Cook JL, et al. The IOC Centres of excellence bring prevention to sports medicine. *Br J Sports Med* 2014;48:1270–5.
- 6 Mountjoy M, Andersen LB, Armstrong N, et al. International Olympic Committee consensus statement on the health and fitness of young people through physical activity and sport. *Br J Sports Med* 2011;45:839–48.
- 7 Bahr R, Krosshaug T. Understanding injury mechanisms: a key component of preventing injuries in sport. *Br J Sports Med* 2005;39:324–9.
- 8 Meeuwisse WH. Assessing causation in sport injury: a multifactorial model. *Clin J Sport Med* 1994;4:166–70.
- 9 Meeuwisse WH, Tyreman H, Hagel B, et al. A dynamic model of etiology in sport injury: the recursive nature of risk and causation. *Clin J Sport Med* 2007;17:215–9.
- 10 Bittencourt NF, Meeuwisse WH, Mendonça LD, et al. Complex systems approach for sports injuries: moving from risk factor identification to injury pattern recognition-narrative review and new concept. *Br J Sports Med* 2016:1309.14.
- 11 Cook C. Predicting future physical injury in sports: it's a complicated dynamic system. *Br J Sports Med* 2016.bjsports-2016.
- 12 Hristovski R, Balagué N, Schöllhorn W, et al. Basic notions in the science of complex systems and nonlinear dynamics. In: Davids K, Hristovski R, Araújo D, eds. *Complex systems in sport*. London: Routledge, 2014:3–17.
- 13 Balagué N, Torrents C, Hristovski R, et al. Sport science integration: an evolutionary synthesis. *Eur J Sport Sci* 2017;17:51–62.
- 14 Eissing T, Kuepfer L, Becker C, et al. A computational systems biology software platform for multiscale modeling and simulation: integrating whole-body physiology, disease biology, and molecular reaction networks. *Front Physiol* 2011;2:4.
- 15 Balagué N, Hristovski R, Vainoras A, et al. Psychobiological integration during exercise. In: Davids K, Hristovski R, Araújo D, eds. *Complex systems in sport*. London: Routledge, 2014:82–102.
- 16 Buldyrev SV, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature* 2010;464:1025–8.
- 17 Callaway DS, Newman ME, Strogatz SH, et al. Network robustness and fragility: percolation on random graphs. *Phys Rev Lett* 2000;85:5468–71.
- 18 Noble D. *The music of life: biology beyond genes*. New York: Oxford University Press, Inc, 2006.

- 19 Butterfield TA. Eccentric exercise in vivo: strain-induced muscle damage and adaptation in a stable system. *Exerc Sport Sci Rev* 2010;38:51–60.
- 20 McCall A, Carling C, Nedelec M, et al. Risk factors, testing and preventative strategies for non-contact injuries in professional football: current perceptions and practices of 44 teams from various premier leagues. *Br J Sports Med* 2014;48:1352–7.
- 21 McCall A, Carling C, Davison M, et al. Injury risk factors, screening tests and preventative strategies: a systematic review of the evidence that underpins the perceptions and practices of 44 football (soccer) teams from various premier leagues. *Br J Sports Med* 2015;49:583–9.
- 22 Goode AP, Reiman MP, Harris L, et al. Eccentric training for prevention of hamstring injuries may depend on intervention compliance: a systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med* 2015;49:349–56.
- 23 Woodley BL, Newsham-West RJ, Baxter GD, et al. Chronic tendinopathy: effectiveness of eccentric exercise. *Br J Sports Med* 2007;41:188–98.
- 24 Hibbert O, Grant A, Beers A. a systematic review of the effectiveness of eccentric strength training in the prevention of hamstring muscle strains in otherwise healthy individuals. 2008;3:67–81.
- 25 Haken H. Synergetics: an approach to self-organization. In: Yates FE, ed. *Self-organizing systems: the emergence of order*. New York: Plenum Press, 1987:417–34.
- 26 Hristovski R, Balagué N. Fatigue-induced spontaneous termination point--nonequilibrium phase transitions and critical behavior in quasi-isometric exertion. *Hum Mov Sci* 2010;29:483–93.
- 27 Hoppeler H, Baum O, Lurman G, et al. Molecular mechanisms of muscle plasticity with exercise. *Compr Physiol* 2011;1:1383–412.
- 28 Latash ML, Scholz JP, Schönér G. Toward a new theory of motor synergies. *Motor Control* 2007;11:276–308.
- 29 Hodges PW, Tucker K. Moving differently in pain: a new theory to explain the adaptation to pain. *Pain* 2011;152:S90–S98.
- 30 Sterling M, Jull G, Wright A. The effect of musculoskeletal pain on motor activity and control. *J Pain* 2001;2:135–45.
- 31 Stergiou N, Decker LM. Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology: is there a connection? *Hum Mov Sci* 2011;30:869–88.
- 32 Hamill J, Palmer C, Van Emmerik RE. Coordinative variability and overuse injury. *Sports Med Arthrosc Rehabil Ther Technol* 2012;4:1.
- 33 Scheffer M, Bascompte J, Brock WA, et al. Early-warning signals for critical transitions. *Nature* 2009;461:53–9.
- 34 Vázquez P, Hristovski R, Balagué N. The Path to Exhaustion: time-variability properties of coordinative variables during continuous exercise. *Front Physiol* 2016;7:37.
- 35 Bahr R, Holme I. Risk factors for sports injuries—a methodological approach. 2003;37:384–93.
- 36 Mendiguchia J, Alentorn-Geli E, Brughelli M. Hamstring strain injuries: are we heading in the right direction? *Br J Sports Med* 2012;46:81–5.
- 37 Newell KM. Constraints on the development of coordination. *Mot Dev Child Asp Coord Control* 1986;34:341–60.
- 38 Davids K, Glazier P, Arajo D, et al. Movement systems as dynamical systems. *Sports Medicine* 2003;33:245–60.
- 39 McKeon PO, Hertel J. The dynamical-systems approach to studying athletic injury. *Athl Ther Today* 2006;11:31–3.
- 40 Holt KG, Wagenaar RO, Saltzman E. A dynamic systems: constraints approach to rehabilitation. *Brazilian Journal of Physical Therapy* 2010;14:446–63.
- 41 Newell KM, Valvano J. Movement science: therapeutic intervention as a constraint in learning and relearning movement skills. *Scand J Occup Ther* 1998;5:51–7.
- 42 Wikstrom EA, Hubbard-Turner T, McKeon PO. Understanding and treating lateral ankle sprains and their consequences. *Sports Medicine* 2013;43:385–93.
- 43 Holmberg PM. Agility training for experienced athletes: a dynamical systems approach. *Strength Cond J* 2009;31:73–8.
- 44 Jeffreys I. A task-based approach to developing context-specific agility. *Strength Cond J* 2011;33:52–9.
- 45 Glazier PS, Davids K. Constraints on the complete optimization of human motion. *Sports Med* 2009;39:15–28.
- 46 Seifert L, Chollet D. Inter-limb coordination and constraints in swimming: a review. In: Beaulieu NP, ed. *Physical activity and children: New research*. New York: Nova Science Publishers, 2008:65–93.
- 47 Leventer L, Dicks M, Duarte R, et al. Emergence of contact injuries in invasion team sports: an ecological dynamics rationale. *Sports Med* 2015;45:153–9.
- 48 McGinnis PM, Newell KM. Topological dynamics: a framework for describing movement and its constraints. *Hum Mov Sci* 1982;1:289–305.
- 49 Newell KM, Jordan K. Task constraints and movement organization: a common language. In: Davis WE, Broadhead GD, eds. *Ecological task analysis and movement*. Champaign, IL: Human Kinetics, 2007:5–23.
- 50 Lewis CL, Sahrman SA, Moran DW. Anterior hip joint force increases with hip extension, decreased gluteal force, or decreased iliopsoas force. *J Biomech* 2007;40:3725–31.
- 51 Pethick J, Winter SL, Burnley M. Fatigue reduces the complexity of knee extensor torque fluctuations during maximal and submaximal intermittent isometric contractions in man. *J Physiol* 2015;593:2085–96.
- 52 Byrne C, Twist C, Eston R. Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage. *Sports Medicine* 2004;34:49–69.
- 53 Woods C, Hawkins RD, Maltby S, et al. The Football Association Medical Research Programme: an audit of injuries in professional football—analysis of hamstring injuries. *Br J Sports Med* 2004;38:36–41.
- 54 Gabbett TJ. The training-injury prevention paradox: should athletes be training smarter and harder? *Br J Sports Med* 2016;50:273–80.
- 55 Windt J, Gabbett TJ. How do training and competition workloads relate to injury? The workload — injury aetiology model. *Br J Sports Med* 2016:1–9.
- 56 Perl J. PerPot: A metamodel for simulation of load performance interaction. *Eur J Sport Sci* 2001;1:1–13.
- 57 Drew MK, Finch CF. The Relationship between training load and injury, illness and soreness: a systematic and literature review. *Sports Med* 2016;46:861–83.
- 58 Burgomaster KA, Hughes SC, Heigenhauser GJ, et al. Six sessions of sprint interval training increases muscle oxidative potential and cycle endurance capacity in humans. *J Appl Physiol* 2005;98:1985–90.
- 59 Bogdanis GC. Effects of physical activity and inactivity on muscle fatigue. *Front Physiol* 2012;3:142.
- 60 Ekstrand J, Hägglund M, Waldén M. Injury incidence and injury patterns in professional football: the UEFA injury study. *Br J Sports Med* 2011;45:731–7.
- 61 Motter AE, Lai YC. Cascade-based attacks on complex networks. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys* 2002;66:2–5.
- 62 Aragonés D, Balagué N, Hristovski R, et al. Fluctuating dynamics of perceived exertion in constant-power exercise. *Psychol Sport Exerc* 2013;14:796–803.
- 63 Craig AD. *How do you feel?: an interoceptive moment with your neurobiological self*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2015.
- 64 Ekstrand J, Lundqvist D, Lagerbäck L, et al. Is there a correlation between coaches' leadership styles and injuries in elite football teams? A study of 36 elite teams in 17 countries 2017:1–6.
- 65 Rhudy JL, Meagher MW. Fear and anxiety: divergent effects on human pain thresholds. *Pain* 2000;84:65–75.
- 66 Pijpers J.R.(Rob), Oudejans RRD, Holsheimer F, et al. Anxiety–performance relationships in climbing: a process-oriented approach. *Psychol Sport Exerc* 2003;4:283–304.
- 67 Ingber DE. Tensegrity and mechanotransduction. *J Bodyw Mov Ther* 2008;12:198–200.

4.0 Discusión

“Cuando la ciencia ganó su batalla contra la iglesia por la libertad de abrigar sus propias hipótesis, se convirtió a su vez en la principal depositaria de la idea de que formas concretas de conocimiento podían ser verdades absolutas, o al menos acercarse a ellas.

Esta creencia en el poder último del saber científico daba a mucha gente una gran sensación de seguridad, casi comparable a los sentimientos experimentados por quienes tienen una fe absoluta en las verdades de la religión. No obstante, existía un rechazo a cuestionar los fundamentos primeros sobre los que descansaba la base de esta verdad”

David Bohm y F. David Peat

En el primer artículo de la tesis, *¿Ciencia o pseudociencia de la actividad física y el deporte?* planteamos y discutimos la presencia de ideas pseudocientíficas en diferentes ámbitos de la actividad física y el deporte. En él se definió la pseudociencia como *“la que usa mal el proceso científico, o interpreta los resultados de forma inadecuada”*, siendo esta una definición muy similar a la que realizan otros autores (Lilienfeld, Ammirati y David, 2012). Sin embargo, no deja de ser una definición incompleta, pues para determinar qué tipo de trabajos hacen un mal uso del proceso científico, deberíamos primero definir cuál es ese proceso y, por extensión, qué es la ciencia. La realidad es que hoy en día, ni en el ámbito científico general (Amrhein y Korner-Nievergelt, 2017; Amrhein y Greenland, 2018; Amrhein, Greenland y McShane, 2019; Amrhein, Trafimow y Greenland, 2019; Gelman, 2016; McShane y col., 2019; Wasserstein y Lazar, 2016;), ni en el ámbito específico de las ciencias del deporte (Lohse y col., 2020), existe un consenso claro sobre algunos de los aspectos más importantes del método científico. Consecuentemente, de facto, la ciencia se acaba convirtiendo en aquello que es publicado en una revista científica, especialmente cuando ésta tiene un alto factor de impacto. Sin embargo, como hemos visto en algunos ejemplos desarrollados en esta memoria, ni siquiera un artículo publicado en alguna de las revistas con mayor factor de impacto en ciencias del deporte, es necesariamente garantía de rigor científico absoluto. Así, la necesidad de *“cuestionar los fundamentos primeros sobre los que descansaba la base de esta verdad (científica)”* (Bohm y Peat, 1988) se vuelve cada día más evidente. De lo contrario, si creemos en afirmaciones sobre las que no hay pruebas suficientemente válidas como para demostrarlas, simplemente basándonos en quien o qué medio transmite esta información, nuestro conocimiento estará basado en la fe, que no es otra

cosa que la “*creencia que se da a algo por la autoridad de quien lo dice o por la fama pública*” (Real Academia Española, S.f., definición 4).

Este déficit de rigor científico, que genera afirmaciones sin las evidencias necesarias, puede llegar a ser tan inadecuada como la falta total de evidencia científica. Hemos visto como esas falsas evidencias constriñen las percepciones y trabajos de la mayoría de profesionales que, por ejemplo, siguen realizando y creyendo en el ejercicio excéntrico como método para reducir sus lesiones (Lago y col., 2020; McCall y col., 2014), aun cuando esas lesiones no paran de aumentar (Ekstrand, Waldén y Hägglund, 2016; Okoroha y col., 2019). Afrontar sin miedo una crítica constructiva del proceso científico actual es indispensable si pretendemos que el conocimiento siga una evolución Darwiniana y no las voluntades de un diseño inteligente.

En los siguientes 3 artículos, apoyados sobre los principios de la evolución biológica y sistemas dinámicos complejos, así como en la perspectiva de los constreñimientos, se han elaborado principios para ayudar a entender mejor los fenómenos sociales y biológicos que suceden en la práctica deportiva. A pesar de su relativamente reciente penetración en las ciencias del deporte, la publicación de trabajos desde la perspectiva de los sistemas complejos y, especialmente, sobre la teoría de los constreñimientos, ha aumentado exponencialmente en los últimos años. Sin embargo, por primera vez se ofrece una sistematización de principios teóricos y metodológicos basados en los sistemas complejos y las teorías de la evolución biológica, que pueden facilitar la aplicación de dichos principios, incluso para los lectores menos familiarizados con las mencionadas líneas de trabajo. A partir de esta nueva concepción surgen tantas aplicaciones prácticas como contextos de rendimiento / entrenamiento existan.

En los artículos de esta tesis el lector habrá podido descubrir el estado del arte específico y su discusión en relación a los temas estudiados, apreciando la evolución que ha supuesto para la teoría y práctica del entrenamiento la aplicación de dichas teorías. No obstante, la transformación conceptual del entrenamiento ha sido hasta la fecha muy limitada. Ello queda bien ilustrado por la gran estabilidad de la que gozan la mayoría de las premisas teóricas y prácticas vigentes. En cambio, como el propio título de la memoria indica, el fin último de la misma es el de actualizar los supuestos teóricos, prácticos y las hipótesis de investigación en el entrenamiento deportivo y, por extensión,

de las ciencias del deporte. En este sentido, destacaría tres supuestos básicos limitadores que esta tesis propone actualizar y cambiar.

- La escala “micro” como la más básica para el análisis

La utilidad de la escala macroscópica para capturar la información relevante de un sistema está frecuentemente infravalorada en la investigación en ciencias del deporte y las publicaciones científicas que se derivan de la misma. Sin embargo, el rendimiento deportivo se manifiesta a nivel macroscópico. De hecho, como hemos comentado a lo largo de la memoria y los artículos, existe el falso supuesto de que la escala microscópica (lo que ocurre a nivel genético, celular, etc.) es la más relevante para estudiar las características o propiedades de un sistema. El reduccionismo asume erróneamente que procesos microscópicos pueden explicar fenómenos que se manifiestan a escala macroscópica. Sin embargo, se sabe que a cada nuevo nivel (celular, tisular, orgánico, etc.) emergen nuevas propiedades que no pueden ser explicadas por ninguno de los componentes y propiedades del nivel inferior. Por ejemplo, tal como se señala en el artículo *Ciencia o pseudociencia de la actividad física y el deporte*, los cambios electroquímicos que se producen a nivel de sinapsis neuronales o los procesos metabólicos que ocurren en la fibra muscular, no permiten explicar fenómenos que se manifiestan a nivel macroscópico como la toma de decisiones o la fatiga psicobiológica, respectivamente. En cambio, dichos fenómenos pueden ser satisfactoriamente explicados a través de modelos comportamentales o fenomenológicos (Araújo, Davids y Hristovski, 2006; Balagué y col. 2014; Venhorst, Micklewright y Noakes, 2018), e inspirar nuevas hipótesis de investigación así como la creación de metodologías de trabajo alternativas.

La justificación y reclamo de este cambio de perspectiva es una constante a lo largo de los artículos que conforman la tesis. Tanto para comprender y prevenir las lesiones deportivas como para fundamentar criterios generales de entrenamiento se ha evitado reproducir los supuestos limitantes del reduccionismo. El artículo *On the Relatedness and Nestedness of Constraints* nos ofrece un cambio de perspectiva en relación a cómo se relacionan los múltiples constreñimientos y escalas que influyen en el rendimiento deportivo y la prevención de lesiones. Se pasa de explicar los fenómenos de abajo a arriba, o de lo micro a lo macroscópico (“bottom-up”), a explicarlos a través de mecanismos de causalidad circular (“bottom-up/top-down”). Es decir, los

constreñimientos que actúan a nivel microscópico (p.e., el metabolismo celular o las microlesiones) y a nivel macroscópico (p.e., los valores personales o la motivación) interactúan anidados en escalas temporales y a través de causalidad circular para explicar fenómenos aparentemente dispares como el rendimiento deportivo o las lesiones. La propiedad de causalidad circular supone un giro copernicano en relación a cuáles son las escalas más fundamentales.

Por ejemplo, en el artículo *From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review*, ponemos de manifiesto la incapacidad de entender los mecanismos de lesión muscular *in vivo* analizando la tensión que sufre la fibra muscular. En cambio, proponemos incorporar el estudio de cómo los constreñimientos personales y del entorno, que actúan a diferentes escalas temporales, juegan un papel primordial en la modificación de la susceptibilidad del sistema músculo esquelético. Esto supone un cambio de paradigma a la hora de entender la etiología de las lesiones y su prevención. Décadas poniendo el foco y analizando qué pasa en la célula muscular nos han llevado a preguntarnos y analizar una y otra vez ¿Cuánta tensión puede soportar esa fibra? ¿Qué gestos son los que suponen un incremento en esa tensión? ¿Qué tipo de ejercicios reproducen esa tensión máxima y mejoran la tolerancia de ese biomaterial al estiramiento? Sin embargo, desde el nuevo paradigma pasamos a preguntarnos ¿Cómo se modifica la susceptibilidad del sistema? ¿Por qué un mismo esfuerzo es tolerado en un momento dado y no en otro? ¿Cómo interaccionan los diferentes constreñimientos y cuales son más determinantes? Este cambio de perspectiva no modifica solo los supuestos teóricos de investigación, sino la práctica profesional. Supone pasar de un enfoque basado en aumentar la tolerancia máxima del músculo a la tensión excéntrica, hacia una nueva perspectiva basada en la gestión de los entornos de entrenamiento y competición, que permite manejar y aumentar los umbrales de susceptibilidad a la lesión. El desarrollo del potencial de diversidad y adaptación del deportista a entornos cada vez más complejos, le permitirá adaptarse de forma cada vez más eficaz y eficiente a una mayor diversidad de situaciones, permitiendo reducir su susceptibilidad a sufrir una lesión.

De forma análoga, en el artículo *Training or synergizing? Complex systems principles change the understanding of sport processes* se explican los objetivos y principios del proceso de entrenamiento sin reducirlo a dimensiones elementales (condición física, técnica, táctica, etc.), y se proponen estrategias de intervención que integran, a través de

sinergias, los múltiples niveles y dimensiones (social, psicológico, fisiológico, etc.). A partir del concepto de anidamiento temporal, los constreñimientos cruciales del rendimiento / entrenamiento dejan de ser los que operan a microescala (p.e. una determinada concentración de ácido láctico o un determinado valor de fuerza isocinética de los “isquios”), para ser los de escalas temporales de evolución más lenta, que influyen de forma más constante en el sistema y que corresponden a niveles organizativos superiores (p.e., nivel social). Esta nueva organización de las prioridades en el análisis del rendimiento y en la organización del entrenamiento permite mejorar no solo la eficacia, sino que confiere un nivel superior de eficiencia al entrenamiento por su efecto sobre otros niveles (sistémico, orgánico, celular, etc.).

La creencia casi universal de que el nivel fundamental en ciencia es el microscópico no es más que un prejuicio, un sesgo con el que conviven diferentes ramas de las ciencias biomédicas, y en particular, la fisiología del ejercicio. Esto ha provocado que las disciplinas de estudio (fisiología, psicología, anatomía, técnica, condición física, etc.) sean comúnmente entendidas como entidades de ontología natural y no, como en realidad son, como constructos sociales. La emergencia de nuevas ramas científicas como la fisiología de redes aplicada al ejercicio (Balagué et al., 2020), basada en principios de los sistemas complejos y focalizada en el estudio de interacciones y principios de coordinación e integración de los sistemas fisiológicos que operan a diferentes niveles y escalas temporales, tiene un gran potencial para romper dichos constructos y mejorar la eficacia de la investigación y la práctica deportiva.

- Parcelación del rendimiento

Como consecuencia del anterior apartado, y a pesar de la evolución experimentada por la investigación en entrenamiento deportivo, el proceso de entrenamiento y el análisis del rendimiento siguen fuertemente influenciados por la parcelación disciplinar. Incluso aquellos trabajos planteados desde la perspectiva de los sistemas complejos o el CLA, intentan aplicar los nuevos conceptos a los clásicos campos de entrenamiento, como el entrenamiento de la fuerza (Fernández-Valdés y col., 2020), la técnica (Ozuak y Çağlayan, 2019), o la capacidad de salto (Gaspar y col., 2019).

Fuera de estos ámbitos específicos la tendencia a mantener la parcelación respetando las estructuras clásicas del rendimiento es mucho más clara aún. Ejemplo de ello son las

preguntas a las que sigue intentando responder la investigación y la práctica deportiva que, a pesar de haber visto cómo van cambiando los métodos de trabajo, siguen siendo las mismas que décadas atrás ¿Cómo mejoramos la condición física? (García Ramos, Haff, Feriche y Jaric, 2018) ¿Cómo mejoramos la toma de decisiones? (Cotterill y Discombe, 2016) ¿Qué ejercicios podemos hacer para prevenir lesiones? (Fanchini y col., 2020). En el mejor de los casos encontramos nuevos términos (control motriz en lugar de técnica, o estructura condicional en lugar de condición física), pero se sigue entendiendo el rendimiento como un proceso en el que diferentes estructuras de la persona (p.e. la relacionada con la coordinación, con la condición física o con la toma de decisiones) son identificables, potencialmente fragmentables y, en consecuencia, también integrables. Esta última opción, que supone trabajar de forma conjunta algunas (incluso todas) de esas estructuras, ha sido probablemente la tendencia predominante durante los últimos años, tanto en el campo práctico como en el marco académico y de investigación.

En cambio, esta tesis no solo propone la integración parcial de determinados componentes del rendimiento, como por ejemplo la coordinación y la fuerza, sostenida por algunos autores (Bosch, 2016), sino que plantea un enfoque transdisciplinar. Dicho enfoque replantea los supuestos y objetivos básicos del entrenamiento, tal como se describe en el artículo *Training or synergizing? Complex systems principles change the understanding of sport processes*. La propia ontología del entrenamiento, y por extensión sus objetivos generales, son cuestionados y reorganizados, abriendo infinidad de nuevas hipótesis y posibilidades sobre las que basar nuevas líneas de investigación y/o aplicaciones metodológicas.

- Problemas del empirismo dominante

Hemos visto como la ciencia nos inunda de resultados que se acaban consolidando en recetas universales y que no solo son inútiles en la mayoría de los casos, sino que nos otorgan una falsa sensación de control y veracidad que dificulta enormemente la adecuada individualización y contextualización del entrenamiento. Irónicamente, estos diseños experimentales que, en la mayoría de los casos son poco aplicables a la realidad, pues ofrecen poca información sobre la respuesta individual o representan contextos muy específicos y difícilmente extrapolables, son considerados más prácticos que aquellos trabajos en los que se pretende explicar los principios universales que guían el comportamiento de los equipos y deportistas.

Esta tesis, que tiene un enfoque predominantemente deductivo, mucho menos habitual en ciencias del deporte, pretende superar los problemas de un empirismo falto de razonamiento científico. La publicación e impacto de los artículos en revistas de reconocido prestigio (p.e. el 30 de mayo de 2020 el artículo *From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review* se encontraba en el percentil 98 de atención según los datos de Altmetric) otorgan visibilidad a este tipo de investigaciones con perspectiva deductiva, lo que podría suponer una invitación a nuevos trabajos que sigan la misma línea.

Una de las principales limitaciones del enfoque inductivo analítico dominante y del uso de metodologías experimentales basadas en la comparación de medias en ciencias del deporte es su incapacidad para abordar la individualidad. Personalmente, creo que la contextualización e individualización de las intervenciones de los profesionales de la actividad física y el deporte es el gran reto en las próximas décadas. Ello requerirá, sin lugar a dudas, cambios metodológicos muy importantes y profundos en la investigación, que posibiliten el desarrollo de nuevas herramientas que ofrezcan un soporte eficaz a los profesionales del deporte en su toma de decisiones cotidiana. Además, necesitará promover un cambio de mentalidad y una actualización de todos los estamentos implicados. Desde las instituciones responsables de los planes de formación, a los profesionales deportivos que a pie de campo deberán renovar su comprensión del deporte así como su *modus operandi*.

En cuanto a la formación, creo necesaria una transformación radical que huya de la especialización en disciplinas deportivas, que a efectos científicos y prácticos tiene una importancia anecdótica, y se focalice en los principios generales que rigen el comportamiento humano y social en sus diferentes dimensiones para comprender y desarrollar la mejora de las habilidades cruciales que favorecen el rendimiento y la salud. De lo contrario, se consolidará la tendencia de los graduados universitarios en ciencias de la actividad física y el deporte a convertirse en técnicos deportivos que a duras penas aportan valor añadido respecto a otros profesionales de rango académico inferior. Si como ocurre en la educación de estos últimos, se limita la formación universitaria a aprender los protocolos recomendados para cada disciplina deportiva, el cambio de paradigma y la revalorización del graduado universitario serán mucho más complicadas. Además, ante

los inmensos retos que abre el nuevo paradigma, y ante el rápido aumento de las publicaciones y evidencias científicas relacionadas con el mismo, que obligan a cuestionar muchas certezas tradicionales, el mayor desafío de la formación debería ser, en lugar de dotar de un conocimiento dogmático, el desarrollo de un pensamiento crítico en el alumnado. Explica Nietzsche en su obra *Aurora. Reflexiones sobre los prejuicios morales* que “la forma más segura de corromper a un joven es instruyéndolo a tener más alta estima por aquellos que piensan igual que por aquellos que piensan distinto”. Sin embargo, están muy lejos las universidades que he tenido la oportunidad de conocer hasta la fecha de fomentar el espíritu crítico, la discrepancia constructiva con el *statu quo* y la creatividad científica que permite avanzar y desarrollar nuevos conocimientos. Ojalá, cuando el próximo Walter Isaacson (uno de los más reputados biógrafos de nuestro tiempo), estudie las mentes más brillantes de nuestro siglo, llegue a conclusiones muy diferentes a las que llegó el primero, quien afirma que “Leonardo da Vinci tuvo la suerte de ser bastardo. Sino habría ido a la universidad como su padre y su abuelo” (Isaacson, 2018).

4.1 Limitaciones y perspectivas de futuro

“El futuro no se puede predecir, pero se puede inventar”

Dennis Gabor

En el punto “2.3 Consecuencias en el entrenamiento deportivo y la prevención de lesiones” hemos analizado los motivos por los cuales no es posible ofrecer “recetas” o “soluciones ideales”, sino que el objetivo principal de los trabajos publicados ha sido el de ofrecer nuevos criterios y enfoques teórico/prácticos a los profesionales. Aun así, es posible que, ante el hábito de recibir soluciones muy concretas a problemáticas tipificadas, algunos lectores echen de menos soluciones más concretas a su problemática diaria.

En este sentido, me gustaría recalcar que en mi caso la investigación es un complemento a mi principal labor profesional, que como he comentado al inicio de la memoria, durante la última década ha estado centrada en el entrenamiento profesional en fútbol. Así, puedo asegurar con rotundidad que esta serie de principios me han guiado y resultado tremendamente útiles para guiar mi toma de decisiones en los diferentes espectros en los que mi profesión me ha requerido hacerlo.

En algunos de los aspectos del entrenamiento clásico, como puede ser el entrenamiento excéntrico y su relación con la prevención de lesiones, sobre los que tanto en los artículos como en la memoria se ha hecho un análisis muy crítico, me gustaría recalcar que pocas cosas en esta vida me harían más feliz que solventar el problema de las lesiones con intervenciones tan sencillas como el Nordic Hamstring. Los momentos en los que un deportista bajo mi tutela cae lesionado están sin duda alguna entre los más tristes de mi profesión. Sin embargo, por desgracia, ni en la confusa evidencia científica, ni analizando la relación entre las prácticas habituales en los equipos profesionales y los datos estadísticos relacionados con la epidemiología lesional, podemos encontrar motivos para perpetuar obstinadamente este tipo de prácticas. No obstante, es posible que este tipo de razonamientos contrarios al *statu quo*, y que probablemente generen inseguridad e inquietud al lector con afinidad a ese tipo de trabajo, constriñan la flexibilidad del lector para adentrarse en esta nueva perspectiva.

En el campo de la investigación se abren grandes retos que deberán afrontar los numerosos problemas que no solo en esta tesis, sino una parte importante de la comunidad científica (tal y como hemos mencionado con anterioridad) identifica en el proceso científico actual. Si la comunidad científica cae en la autocomplacencia, y se limita a defender su posición de autoridad y garante de la objetividad y el conocimiento de la que hoy día goza de manera casi hegemónica, corre el serio riesgo de ver degradada su posición, como ha sucedido en el pasado con las autoridades (filosofía, iglesia, etc.) que disponían de ese mismo status.

De cara al futuro se abren multitud de nuevas hipótesis que permiten abrir casi una infinidad de nuevas líneas de investigación. No obstante, no solo el desarrollo de estas líneas (muchas de ellas ya en proceso) es necesario, sino que es de gran importancia que esos contenidos tengan incidencia real en todos los ámbitos relacionados con las ciencias del deporte. En este sentido, y a pesar de su auge en el ámbito científico, la penetración en el ámbito académico y práctico de estas nuevas concepciones es todavía muy limitado, por lo que el desarrollo de materiales adaptados a las nuevas plataformas de divulgación (como redes sociales, plataformas de formación on line, etc.), que tienen gran impacto, especialmente en las generaciones más jóvenes, es sin duda uno de los principales retos. En este sentido, el grupo Complex Systems in Sport, del INEFC de Catalunya, del que soy orgulloso miembro, está haciendo una gran labor que espero continúe y mejore en el futuro.

En ámbito del rendimiento, uno de los principales retos es el de seguir mejorando la comprensión del equipo como sistema dinámico complejo. El desarrollo de nuevas herramientas y medidas que ayuden a valorar el estado del equipo y su potencial de diversidad facilitará la labor de los profesionales que opten por fundamentar su entrenamiento en esa unidad básica, sin abandonar por ello la unidad individual que se nutre de la colectiva y la conforma, pudiendo suponer una de las herramientas más útiles para aumentar, precisamente, el potencial de diversidad de esos equipos (Hristovski y Balagué 2020).

En relación a las lesiones es necesario un cambio en las prioridades de investigación. En la actualidad hay muchísimas líneas de investigación enfocadas a entender como la carga externa, especialmente las acciones a alta intensidad, medidas generalmente con los dispositivos comúnmente conocidos como GPS, afecta a deportistas de diferentes

disciplinas. Sin embargo, las investigaciones enfocadas a conocer mejor al deportista y, especialmente, a que el deportista se conozca mejor, son muy limitadas. En los últimos años ha habido numerosas investigaciones en las que se estudia la relación entre la percepción subjetiva de esfuerzo y el rendimiento (Rago y col., 2020), pero estas investigaciones se limitan generalmente a analizar la habilidad del deportista para relacionar su estado con una escala externa y como esta se correlaciona con diferentes parámetros relacionados con el rendimiento o las lesiones. Desarrollar nuevos métodos para evaluar y mejorar la capacidad de los deportistas de regular su actividad en base a cómo se encuentran puede ser, sin duda alguna, uno de los mayores avances en la prevención de lesiones durante los próximos años (Balagué et al., 2017; Pol et al., 2018).

A su vez, a pesar que durante las últimas décadas se han propuesto decenas de sistemas basados en imágenes clínicas (especialmente ecografía y resonancia magnética), muchos siguen careciendo de evidencia y de valor pronóstico (Grassi y col., 2016). El desarrollo o perfeccionamiento de métodos y conocimientos que permitan valorar medidas de conectividad y susceptibilidad del sistema muscular es también uno de los retos que surgen de esta nueva comprensión de la lesión muscular.

5.0 Conclusiones

“El hombre está siempre dispuesto a negar aquello que no comprende”.

Blaise Pascal

La actual teoría y práctica profesional en ciencias del deporte está contaminada por creencias limitadoras y teorías infundadas o desfasadas que deben ser actualizadas (Bailey y col., 2018; Balagué, Pol y Guerrero, 2019). Con tal fin se propone revisar críticamente el material docente de los programas de formación e introducir el desarrollo de teorías científicas desde una perspectiva histórica para promover la adquisición de un pensamiento crítico que ayude a distinguir, tanto al alumnado como a los profesionales, entre ciencia y pseudociencia. Ello facilitará la apertura de miras hacia nuevos modelos y teorías científicas no limitadas al conocimiento tradicional y hegemónico. Éstas son algunas de las propuestas del primero de los artículos de esta tesis que pueden ayudar a corregir la proliferación de prácticas pseudocientíficas y “neuromitos” tanto en la formación como en el entrenamiento deportivo.

Con el fin de mejorar la investigación y práctica profesional, se ha optado por el desarrollo de principios, de base eminentemente deductiva, que permitan mejorar la comprensión de los procesos básicos relacionados con el rendimiento y la susceptibilidad de lesión. La mejora en la comprensión de estos principios puede facilitar la toma de decisiones de los profesionales de la actividad física y el deporte y mejorar la eficacia de sus intervenciones con fines educativos, de gestión, de rendimiento y salud. Concretamente, comprender mejor la naturaleza emergente de las tareas y los constreñimientos de la tarea puede ser una herramienta útil para lograr una mayor involucración de los deportistas y otros agentes en los procesos relacionados con la mejora del rendimiento. El reconocimiento de la organización anidada a diferentes escalas temporales de los constreñimientos puede permitir una organización más eficiente de las intervenciones. Por ejemplo, intervenir sobre constreñimientos más estables (como los valores personales del deportista) provocará un efecto en cascada sobre su motivación, objetivos, atención y posibilidades de acción percibidas, que cambian a escalas temporales de más corta duración. Por ejemplo, sin cambiar los valores es muy difícil que los cambios en las intenciones sean efectivos y estables en el tiempo. Asimismo, la propiedad de interdependencia y causalidad circular de los

constricciones pueden ser usadas para mejorar los procesos de integración del entrenamiento.

Las aplicaciones prácticas de estas nuevas propiedades de los constricciones, transferibles a todos los deportes y a toda la población, desde deportistas en formación hasta profesionales, pueden ser ilimitadas. Huyendo de la tradicional prescripción de soluciones concretas a problemáticas y situaciones teóricas tipificadas (Bahr, Thorborg y Ekstrand, 2015) se propone adaptar a cada contexto único e irrepetible soluciones únicas. Se evita por ello hablar de una nueva metodología de entrenamiento derivada de los sistemas complejos, en favor de proponer nuevos principios a través de los que guiar la toma de decisiones de los profesionales. La distinta comprensión del proceso cambia no solo la manera de resolver las problemáticas concretas clásicamente planteadas, sino el enfoque general del entrenamiento deportivo. El rol del entrenador o entrenadora en el proceso, el propósito último del entrenamiento y la propia naturaleza del deporte son también cuestionados. El rol del entrenador o la entrenadora que, tanto desde una perspectiva más clásica como en recientes publicaciones basadas en sistemas complejos (Correia y col., 2019), es entendido como encargado de modelizar el rendimiento de los deportistas y/o del equipo a partir del análisis de la competición y los rivales, cambia también. Desde el nuevo enfoque se entiende la función de los entrenadores y entrenadoras como encargados de facilitar entornos y retos para el desarrollo de nuevas sinergias que aumenten el potencial de diversidad y adaptabilidad a entornos impredeciblemente cambiantes.

Estas prácticas deberán, además de ser eficaces, ser seguras. Esto no comporta necesariamente que el entrenamiento se complemente a través de un apartado preventivo, sino de una mejor comprensión de los procesos mediante los que aumenta la susceptibilidad de lesión. Planteamos que manejar los constricciones no solo tiene fines de rendimiento sino de gestión del riesgo/susceptibilidad de lesión. Esto rompe la clásica dicotomía entre un entrenamiento enfocado a la prevención y uno enfocado al rendimiento. De acuerdo con la hipótesis de la conectividad y la teoría de percolación, cuando la estructura músculo-esquelética aumenta su susceptibilidad de lesión, un estímulo banal puede provocar una lesión incapacitante, de manera que identificar los valores o regiones críticas de los constricciones en los que esa susceptibilidad aumenta se convierte en una de las claves de la prevención de lesiones. El desarrollo de métodos que nos permitan objetivar dichos valores críticos, al igual que el de medidas

objetivas de conectividad del sistema músculo esquelético que nos permitan identificar la susceptibilidad de lesión, se convierten en retos para el futuro derivados de esta nueva comprensión. El desarrollo de la interocepción y consciencia somática de los deportistas y de las medidas de auto-percepción para detectar cambios en la susceptibilidad a las lesiones son también una línea de trabajo e investigación imprescindible para aumentar la eficacia futura de las intervenciones.

Los mismos principios que explican la susceptibilidad de lesión permiten entender el proceso de entrenamiento. Son principios generales que además promueven un conocimiento transdisciplinar, y son aplicables tanto en el ámbito deportivo (con independencia de la disciplina específica), como fuera del mismo. Es decir, desde las ciencias del deporte, podemos comprender cómo se integran diferentes niveles de organización de la materia (de las escalas sub-celulares a las escalas sociales), de manera que podemos transferirlos a otros campos de la ciencia para mejorar la comprensión de diferentes fenómenos. De hecho, la comunidad científica, de forma implícita, ya está dando validez al valor sintético y unificador de dichos principios generales, ya que a pesar del escasísimo tiempo transcurrido entre la publicación de los artículos y la fecha actual, estos principios han sido aplicados ya a diferentes ámbitos de las ciencias del deporte, como la creatividad (Torrents y col., 2020; Vaughan y col., 2019), la readaptación (Tassignon y col., 2019), el análisis biomecánico (Buttfield y Ball, 2020), la prevención de lesiones (Benjaminse y col., 2019), el análisis de datos posicionales (Low y col., 2019) o el análisis táctico individual (Flores-Rodríguez, 2019). Además, estos principios, se han mostrado también útiles en campos ajenos al deporte, como la astronáutica (Connaboy y col., 2020) o la educación (van der Kamp, Withagen, y Orth, 2019), ilustrando el potencial integrador y transdisciplinar de la perspectiva de los sistemas dinámicos complejos.

6.0 Referencias

“Sé menos curioso acerca de las personas y más curioso acerca de las ideas”.

Marie Curie

Ahmad, C. S., Dick, R. W., Snell, E., Kenney, N. D., Curriero, F. C., Pollack, K., ... & Mandelbaum, B. R. (2014). Major and minor league baseball hamstring injuries: epidemiologic findings from the major league baseball injury surveillance system. *The American journal of sports medicine*, 42(6), 1464-1470. doi: 10.1177/0363546514529083

Ahtiainen, J. P., Walker, S., Peltonen, H., Holviala, J., Sillanpää, E., Karavirta, L., Sallinen, J., Mikkola, J., Valkeinen, H., Mero, A. (2016). Heterogeneity in resistance training-induced muscle strength and mass responses in men and women of different ages. *Age*, 38(1), 10. doi: 10.1007/s11357-015-9870-1

Amrhein, V., & Greenland, S. (2018). Remove, rather than redefine, statistical significance. *Nature Human Behaviour*, 2(1), 4. doi: 10.1038/s41562-017-0224-0

Amrhein, V., Greenland, S., & McShane, B. (2019). Scientists rise up against statistical significance. *Nature*, 567(7748), 305-307. doi: 10.1038/d41586-019-00857-9

Amrhein, V., Korner-Nievergelt, F., & Roth, T. (2017). The earth is flat ($p > 0.05$): significance thresholds and the crisis of unreplicable research. *PeerJ*, 2017(7), 1–40. doi: 10.7717/peerj.3544

Amrhein, V., Trafimow, D., & Greenland, S. (2019). Inferential Statistics as Descriptive Statistics: There Is No Replication Crisis if We Don't Expect Replication. *The American Statistician*, 73(sup1), 262–270. doi: 10.1080/00031305.2018.1543137

Andriani, P., & McKelvey, B. (2009). Perspective—From Gaussian to Paretian thinking: Causes and implications of power laws in organizations. *Organization Science*, 20(6), 1053–1071. doi: 10.1287/orsc.1090.0481

- Araujo, D., Davids, K., & Hristovski, R. (2006). The ecological dynamics of decision making in sport. *Psychology of Sport and Exercise*, 7(6), 653–676. doi: 10.1016/j.psychsport.2006.07.002
- Arnason, A., Andersen, T. E., Holme, I., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2008). Prevention of hamstring strains in elite soccer: an intervention study. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 18(1), 40–48. doi: 10.1111/j.1600-0838.2006.00634.x
- Arnason, A., Sigurdsson, S. B., Gudmundsson, A., Holme, I., Engebretsen, L., & Bahr, R. (2004). Risk factors for injuries in football. *The American Journal of Sports Medicine*, 32(1 Suppl), 5–16. doi: 10.1177/0363546503258912
- Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., ... & Burkett, B. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505–510. doi:10.1038/s41586-019-1666-5
- Astorino, T. A., & Schubert, M. M. (2014). Individual responses to completion of short-term and chronic interval training: a retrospective study. *PloS One*, 9(5). doi: 10.1371/journal.pone.0097638
- Bahr, R., Thorborg, K., & Ekstrand, J. (2015). Evidence-based hamstring injury prevention is not adopted by the majority of Champions League or Norwegian Premier League football teams: the Nordic Hamstring survey. *British Journal of Sports Medicine*, 49(22), 1466–1471. doi: 10.1136/bjsports-2015-094826
- Bailey, R. P., Madigan, D. J., Cope, E., & Nicholls, A. R. (2018). The prevalence of pseudoscientific ideas and neuromyths among sports coaches. *Frontiers in Psychology*, 9, 641. doi: 10.3389/fpsyg.2018.00641
- Baker, M. (2016). Reproducibility crisis? *Nature*, 533(26), 353–366. doi: 10.1038/533452a
- Balagué, N., Pol, R., Torrents, C., Ric, A., & Hristovski, R. (2019). On the relatedness and nestedness of constraints. *Sports Medicine-Open*, 5(1), 1–10. doi: 10.1186/s40798-019-0178-z

Balagué, N., Pol, R., & Guerrero, I. (2019). ¿Ciencia o pseudociencia de la actividad física y el deporte? *Apunts: Educación Física y Deportes*, (136), 129–136. doi: 10.5672/apunts.2014-0983.es.(2019/2).136.09

Balagué, N., Torrents, C., Hristovski, R., & Kelso, J. A. S. (2017). Sport science integration: An evolutionary synthesis. *European Journal of Sport Science*, 17(1), 51–62. doi: 10.1080/17461391.2016.1198422

Balagué, N., Gibert, A., Medina, D. Hristovski, R. (2017). The role of self-awareness in injury prevention. In C. Torrents, P. Passos & F. Cos (Eds.), *Complex Systems in Sport International Congress. Linking Theory and Practice*. Lausanne: Frontiers Media ISBN: 978-2-88945-310-8. doi: 10.3389/978-2-88945-310-8

Balagué, N., Hristovski, R., García, S., Aguirre, C., Vázquez, P., Razon, S., & Tenenbaum, G. (2015). Dynamics of Perceived Exertion in Constant-Power Cycling: Time- and Workload-Dependent Thresholds. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 86(4), 371–378. doi: 10.1080/02701367.2015.1078870

Balagué, N., Hristovski, R., Vázquez, P., & Slapsinskaite, A. (2014). Psychobiology of endurance and exhaustion a nonlinear integrative approach. *Research in Physical Education, Sport & Health*, 3(1), 3-11. doi: 10.1109/ISCAS.2002.1010943

Balagué, N., Hristovski, R., Vainoras, A., Vázquez, P., & Aragonés, D. (2014). Psychobiological integration during exercise performed until exhaustion. In K. Davids y col. (Eds.), *Complex Systems in Sport* (pp. 82-102). Routledge.

Balagué, N., Hristovski, R., Almarcha, M. C., García-Retortillo, S., Ivanov, P. (2020). Network Physiology of Exercise: Vision and Perspectives. *Frontiers in Physiology*, 11, 1607. doi:10.3389/fphys.2020.611550

Bamman, M. M., Petrella, J. K., Kim, J., Mayhew, D. L., & Cross, J. M. (2007). Cluster analysis tests the importance of myogenic gene expression during myofiber hypertrophy in humans. *Journal of Applied Physiology*, 102(6), 2232–2239. doi: 10.1152/jappphysiol.00024.2007

Barabási, A. L., & Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286(5439), 509–512. doi: 10.1126/science.286.5439.509

Bem, D. J. (2011). Feeling the future: experimental evidence for anomalous retroactive influences on cognition and affect. *Journal of Personality and Social Psychology*, 100(3), 407. doi: 10.1037/a0021524

Bengtsson, H., Ekstrand, J., Waldén, M., & Hägglund, M. (2018). Muscle injury rate in professional football is higher in matches played within 5 days since the previous match: a 14-year prospective study with more than 130 000 match observations. *British journal of sports medicine*, 52(17), 1116–1122. doi: 10.1136/bjsports-2016-097399

Bengtsson, H., Ekstrand, J., & Hägglund, M. (2013). Muscle injury rates in professional football increase with fixture congestion: an 11-year follow-up of the UEFA Champions League injury study. *British Journal of Sports Medicine*, 47(12), 743–747. doi: 10.1136/bjsports-2013-092383

Benjaminse, A., Webster, K. E., Kimp, A., Meijer, M., & Gokeler, A. (2019). Revised approach to the role of fatigue in anterior cruciate ligament injury prevention: a systematic review with meta-analyses. *Sports Medicine*, 49(4), 565–586. doi: 10.1007/s40279-019-01052-6

Bohm, D., & Peat, D. (1988). *Ciencia, orden y creatividad*. Kairós.

Böhm, A., Weigert, C., Staiger, H., & Häring, H. U. (2016). Exercise and diabetes: relevance and causes for response variability. *Endocrine*, 51(3), 390–401. doi: 10.1007/s12020-015-0792-6

Bonafiglia, J. T., Rotundo, M. P., Whittall, J. P., Scribbans, T. D., Graham, R. B., & Gurd, B. J. (2016). Inter-individual variability in the adaptive responses to endurance and sprint interval training: a randomized crossover study. *PloS One*, 11(12). doi: 10.1371/journal.pone.0167790

Booth, F. W., & Laye, M. J. (2010). The future: genes, physical activity and health. *Acta Physiologica*, 199(4), 549–556. doi: 10.1111/j.1748-1716.2010.02117.x

Boring, E. G. (1919). Mathematical vs. scientific significance. *Psychological Bulletin*, 16(10), 335-338. doi: 10.1037/h0074554

Bosch, F. (2016). *Strength training and coordination: an integrative approach*. 2010 Publishers.

Bouchard, C. (1995). Individual differences in the response to regular exercise. *International Journal of Obesity and related metabolic disorders: journal of the International Association for the Study of Obesity*, 19, S5-S8.

Bouchard, C. (1983). Human adaptability may have a genetic basis. In *Health Risk Estimation, Risk Reduction and Health Promotion. Proceedings of the 18th Annual Meeting of the Society of Prospective Medicine* (pp. 463-476). Ottawa, Ontario, Canada: Canadian Public Health Association.

Bouchard, C., & Rankinen, T. (2001). Individual differences in response to regular physical activity. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(6), S446-S451. doi: 10.1097/00005768-200106001-00013

Bourne, M. N., Timmins, R. G., Opar, D. A., Pizzari, T., Ruddy, J. D., Sims, C., ... Shield, A. J. (2018). An evidence-based framework for strengthening exercises to prevent hamstring injury. *Sports Medicine*, 48(2), 251-267. doi: 10.1007/s40279-017-0796-x

Bricca, A., Juhl, C. B., Bizzini, M., Andersen, T. E., & Thorborg, K. (2018). There are more football injury prevention reviews than randomised controlled trials. Time for more RCT action! *British Journal of Sports Medicine*, 52(22), 1477-1478. doi: 10.1136/bjsports-2018-099373

Brito, J., Nassis, G. P., Seabra, A. T., & Figueiredo, P. (2018). Top 50 most-cited articles in medicine and science in football. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 4(1). doi: 10.1136/bmjsem-2018-000388

Brooks, S. V, Zerba, E., & Faulkner, J. A. (1995). Injury to muscle fibres after single stretches of passive and maximally stimulated muscles in mice. *The Journal of Physiology*, 488(2), 459-469. doi: 10.1113/jphysiol.1995.sp020980

Buchheit, M., Eirale, C., Simpson, B. M., & Lacome, M. (2019). Injury rate and prevention in elite football: Let us first search within our own hearts. *British Journal of Sports Medicine*, 53(21), 1327–1328. doi: 10.1136/bjsports-2018-099267

Buford, T. W., Roberts, M. D., & Church, T. S. (2013). Toward exercise as personalized medicine. *Sports Medicine*, 43(3), 157–165. doi: 10.1007/s40279-013-0018-0

Butterfield, T. A. (2010). Eccentric exercise in vivo: strain-induced muscle damage and adaptation in a stable system. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 38(2), 51–60. doi: 10.1097/JES.0b013e3181d496eb

Buttfield, A., & Ball, K. (2020). The practical application of a method of analysing the variability of within-step accelerations collected via athlete tracking devices. *Journal of Sports Sciences*, 38(3), 343–350. doi: 10.1080/02640414.2019.1699987

Camp, C. L., Dines, J. S., van der List, J. P., Conte, S., Conway, J., Altchek, D. W., ... & Pearle, A. D. (2018). Summative report on time out of play for Major and Minor League Baseball: an analysis of 49,955 injuries from 2011 through 2016. *The American journal of sports medicine*, 46(7), 1727-1732. doi: 10.1177/0363546518765158

Carlin, J. B. (2016). Comment: Is reform possible without a paradigm shift? *The American Statistician*, 90(10).

Carney, D. R., Cuddy, A. J. C., & Yap, A. J. (2010). Power posing: Brief nonverbal displays affect neuroendocrine levels and risk tolerance. *Psychological Science*, 21(10), 1363–1368. doi: 10.1177/0956797610383437

Churchward-Venne, T. A., Tieland, M., Verdijk, L. B., Leenders, M., Dirks, M. L., de Groot, L. C., & Van Loon, L. J. C. (2015). There are no nonresponders to resistance-type exercise training in older men and women. *Journal of the American Medical Directors Association*, 16(5), 400–411. doi: 10.1016/j.jamda.2015.01.071

Connaboy, C., LaGoy, A. D., Johnson, C. D., Sinnott, A. M., Eagle, S. R., Bower, J. L., ... Alfano, C. A. (2020). Sleep deprivation impairs affordance perception behavior during an

action boundary accuracy assessment. *Acta Astronautica*, 166, 270–276. doi: 10.1016/j.actaastro.2019.10.029

Correia, V., Carvalho, J., Araújo, D., Pereira, E., & Davids, K. (2019). Principles of nonlinear pedagogy in sport practice. *Physical Education and Sport Pedagogy*, 24(2), 117-132. doi: 10.1080/17408989.2018.1552673

Cotterill, S., & Discombe, R. (2016). Enhancing decision-making during sports performance: Current understanding and future directions. *AECC University College Research Collection*. <https://aecc.archive.knowledgearc.net/bitstream/handle/123456789/90/Cotterill%2c%20S%202016%20SEPR.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cox, D. R. (1977). The Role of Significance Tests. *Scandinavian Journal of Statistics*, 4(2), 49-70. doi: 10.2307/4615652

Davids, K. W., Button, C., & Bennett, S. J. (Eds.). (2008). *Dynamics of skill acquisition: A constraints-led approach*. Human Kinetics.

Davids, K., Hristovski, R., Araújo, D., Balagué, N., Button, C., & Passos, P. (Eds.). (2013). *Complex systems in sport*. Routledge.

DiSilvestro, K. J., Tjoumakaris, F. P., Maltenfort, M. G., Spindler, K. P., & Freedman, K. B. (2016). Systematic reviews in sports medicine. *The American Journal of Sports Medicine*, 44(2), 533–538. doi: 10.1177/0363546515580290

Drummond, G. B. (2016). Most of the time, P is an unreliable marker, so we need no exact cut-off. *British Journal of Anaesthesia*, 116(6), 894. doi: 10.1093/bja/aew146

Duarte, R., Araújo, D., Correia, V., & Davids, K. (2012). Sports teams as superorganisms. *Sports Medicine*, 42(8), 633–642. doi: 10.2165/11632450-000000000-00000

Eissing, T., Kuepfer, L., Becker, C., Block, M., Coboeken, K., Gaub, T., ... Ludewig, B. (2011). A computational systems biology software platform for multiscale modeling and simulation: integrating whole-body physiology, disease biology, and molecular reaction networks. *Frontiers in Physiology*, 2, 4. doi: 10.3389/fphys.2011.00004

Ekstrand, J., Waldén, M., & Hägglund, M. (2016). Hamstring injuries have increased by 4% annually in men's professional football, since 2001: a 13-year longitudinal analysis of the UEFA Elite Club injury study. *British Journal of Sports Medicine*, 50(12), 731-737. doi: 10.1136/bjsports-2015-095359

Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *The Journal of Physiology*, 586(1), 11-23. doi: 10.1113/jphysiol.2007.139477

Erskine, R. M., Jones, D. A., Williams, A. G., Stewart, C. E., & Degens, H. (2010). Inter-individual variability in the adaptation of human muscle specific tension to progressive resistance training. *European Journal of Applied Physiology*, 110(6), 1117-1125. doi: 10.1007/s00421-010-1601-9

Eysenck, H. J. (1960). The concept of statistical significance and the controversy about one-tailed tests. *Psychological Review*, 67(4), 269-271. doi: 10.1037/h0048412

Ezzo, J., Bausell, B., Moerman, D. E., Berman, B., & Hadhazy, V. (2001). Reviewing the reviews: how strong is the evidence? How clear are the conclusions? *International Journal of Technology Assessment in Health Care*, 17(4), 457-466.

Fanchini, M., Steendahl, I. B., Impellizzeri, F. M., Pruna, R., Dupont, G., Coutts, A. J., ... McCall, A. (2020). Exercise-Based Strategies to Prevent Muscle Injury in Elite Footballers: A Systematic Review and Best Evidence Synthesis. *Sports Medicine*, 50(9), 1653-1666, doi: 10.1007/s40279-020-01282-z

Fernández-Valdés, B., Sampaio, J., Exel, J., González, J., Tous-Fajardo, J., Jones, B., & Moras, G. (2020). The Influence of Functional Flywheel Resistance Training on Movement Variability and Movement Velocity in Elite Rugby Players. *Frontiers in psychology*, 11, 1205. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01205>

Fisher, R. A. (1926). The Arrangement of Field Experiments. *Journal of the Ministry of Agriculture*, 33, 503-515. doi: 10.23637/rothamsted.8v61q

Fisher, R. A. (1956). *Statistical methods and scientific inference. Statistical methods and scientific inference*. Hafner Publishing Co.

Flores-Rodríguez, J. (2019). Pedagogía no lineal en balonmano: ideas generales para su aplicación. En A. Martín-Barrero y P. Camacho (Eds) *Nuevas Tendencias En El Entrenamiento y La Planificación de Los Deportes Colectivos* (pp.4-14). Wanceulen.

Freckleton, G., & Pizzari, T. (2013). Risk factors for hamstring muscle strain injury in sport: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 47(6), 351–358. doi: 10.1136/bjsports-2011-090664

Gandevia, S. C. (2001). Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiological Reviews*, 81(4), 1725–1789. doi: 10.1152/physrev.2001.81.4.1725

García-Ramos, A., Haff, G. G., Feriche, B., & Jaric, S. (2018). Effects of different conditioning programmes on the performance of high-velocity soccer-related tasks: systematic review and meta-analysis of controlled trials. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 13(1), 129–151. doi: 10.1177/1747954117711096

García-Retortillo, S., Gacto, M., O’Leary, T. J., Noon, M., Hristovski, R., Balagué, N., & Morris, M. G. (2019). Cardiorespiratory coordination reveals training-specific physiological adaptations. *European Journal of Applied Physiology*, 119(8), 1701–1709. doi: 10.1007/s00421-019-04160-3

Garrett Jr, W. E. (1996). Muscle strain injuries. *The American Journal of Sports Medicine*, 24(6 Suppl), S2–S8. doi: 10.1177/036354659602406S02

Garrett, J. W. E. (1990). Muscle strain injuries: clinical and basic aspects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 22(4), 436–443. doi: 10.1249/00005768-199008000-00003

Gaspar, A., Santos, S., Coutinho, D., Gonçalves, B., Sampaio, J., & Leite, N. (2019). Acute effects of differential learning on football kicking performance and in countermovement jump. *PloS one*, 14(10), e0224280. doi: 10.1371/journal.pone.0224280

Gelman, A. (2016). The problems with p-values are not just with p-values. *The American Statistician*, 70(10).

Glazier, P. S. (2017). Towards a grand unified theory of sports performance. *Human Movement Science*, 56, 139–156. doi: 10.1016/j.humov.2015.08.001

Glazier, P. S., & Davids, K. (2009). Constraints on the complete optimization of human motion. *Sports Medicine*, 39(1), 15–28. doi: 10.2165/00007256-200939010-00002

González, I. F., Urrútia, G., & Alonso-Coello, P. (2011). Revisión sistemática y metaanálisis: bases conceptuales e interpretación. *Revista Española de Cardiología*, 64(8), 688–696. doi: 10.1016/j.recesp.2011.03.029

Goodchild, van H. (3 de junio de 2019). *Research of the Month: It's time to retire statistical significance*. <https://www.altmetric.com/blog/research-of-the-month-its-time-to-retire-statistical-significance/>

Goode, A. P., Reiman, M. P., Harris, L., DeLisa, L., Kauffman, A., Beltramo, D., ... Taylor, A. B. (2015). Eccentric training for prevention of hamstring injuries may depend on intervention compliance: a systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 49(6), 349–356. doi: 10.1136/bjsports-2014-093466

Grassi, A., Quaglia, A., Canata, G. L., & Zaffagnini, S. (2016). An update on the grading of muscle injuries: a narrative review from clinical to comprehensive systems. *Joints*, 4(1), 39–46. doi: 10.11138/jts/2016.4.1.039

Greenland, S., & Poole, C. (2013). Living with statistics in observational research. *Epidemiology*, 24(1), 73–78. doi: 10.1097/EDE.0b013e3182785a49

Haken, H. (1987). An approach to self-organization. En F. Eugene-Yates (Ed) *Self-Organizing Systems: The Emergence of Order* (417–437). Life Science Monographs.

Hawking, S. (1993). *Black Holes and Baby Universes and Other Essays*. Random House.

Hawking, S., & Mlodinow, L. (2010). *El gran diseño*. Crítica.

Haywood, K., & Getchell, N. (2014). *Life Span Motor Development*. Human Kinetics.

Hibbert, O., Cheong, K., Grant, A., Beers, A., & Moizumi, T. (2008). A systematic review of the effectiveness of eccentric strength training in the prevention of hamstring muscle strains in otherwise healthy individuals. *North American Journal of Sports Physical Therapy: NAJSPT*, 3(2), 67.

Hill, A. V, & Lupton, H. (1923). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *QJM: An International Journal of Medicine*, (62), 135–171.

Holmberg, P. M. (2009). Agility training for experienced athletes: A dynamical systems approach. *Strength and Conditioning Journal*, 31(5), 73–78. doi: 10.1519/SSC.0b013e3181b988f1

Holt, K. G., Wagenaar, R. O., & Saltzman, E. (2010). A dynamic systems: constraints approach to rehabilitation. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 14(6), 446–463. doi:10.1590/S1413-35552010000600002

Hristovski, R., Aceski, A., Balague, N., Seifert, L., Tufekcievski, A., & Cecilia, A. (2017). Structure and dynamics of European sports science textual contents: Analysis of ECSS abstracts (1996–2014). *European Journal of Sport Science*, 17(1), 19–29. doi: 10.1080/17461391.2016.1207709

Hristovski, R., Venskaitytė, E., Vainoras, A., Balagué, N., & Vazquez, P. (2010). Constraints-controlled metastable dynamics of exercise-induced psychobiological adaptation. *Medicina (Kaunas)*, 46(7), 447. doi: 10.3390/medicina46070064

Hubal, M. J., Gordish-Dressman, H., Thompson, P. D., Price, T. B., Hoffman, E. P., Angelopoulos, T. J., ... Visich, P. S. (2005). Variability in muscle size and strength gain after unilateral resistance training. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 37(6), 964–972. doi: 10.1249.01.mss.0000170469.90461.5f

Hurlbert, S. H., & Lombardi, C. M. (2009). Final Collapse of the Neyman-Pearson Decision Theoretic Framework and Rise of the neoFisherian. *Annales Zoologici Fennici*, 46(5), 311–349. doi: 10.5735/086.046.0501

Ioannidis, J. P. A. (2005). Why most published research findings are false. *Plos Medicine*, 2(8), e124. doi: 10.1371/journal.pmed.0020124

Isaacson, W. (5 de junio de 2018). *Da Vinci, el innovador* [Discurso principal]. Ciclo Tech & Society Fundación Telefónica, Madrid, España. <https://www.youtube.com/watch?v=kbSpv-BQMis&t=1625s>

Jeffreys, I. (2011). A task-based approach to developing context-specific agility. *Strength and Conditioning Journal*, 33(4), 52–59. doi: 10.1519/SSC.0b013e318222932a

Jovanović, M. (2019). Statistical Modelling for Sports Scientists: Practical Introduction Using R (Part 1). *SportRxiv*. doi: 10.31236/osf.io/dnq3m

Kennedy, K. W. (1976). International anthropometric variability and its effects on aircraft cockpit design in Chapanis, A., (Ed) *Ethnic Variables in Human Factors Engineering*. The John Hopkins Press.

Kiely, J. (2018). Periodization Theory: Confronting an Inconvenient Truth. *Sports Medicine*, 48(4), 753–764. doi: 10.1007/s40279-017-0823-y

Kline, S. J. (1985). Innovation is not a linear process. *Research Management*, 28(4), 36–45. doi: 10.1080/00345334.1985.11756910

Kubota, J., Ono, T., Araki, M., Torii, S., Okuwaki, T., & Fukubayashi, T. (2007). Non-uniform changes in magnetic resonance measurements of the semitendinosus muscle following intensive eccentric exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 101(6), 713–720. doi: 10.1007/s00421-007-0549-x

Kugler, P. N., Kelso, J. A. S., & Turvey, M. T. (1980). 1 on the concept of coordinative structures as dissipative structures: I. theoretical lines of convergence. *Advances in psychology*, 1, 3–47.

Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. The University of Chicago Press Books.

Kulik, C.-L. C., Kulik, J. A., & Bangert-Drowns, R. L. (1990). Effectiveness of mastery learning programs: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 60(2), 265–299. doi: 10.2307/1170612

Lago-Fuentes, C., Jiménez-Loaisa, A., Padrón-Cabo, A., Mecías-Calvo, M., & Rey, E. (2020). Perceptions of the technical staff of professional teams regarding injury prevention in Spanish national futsal leagues: a cross-sectional study. *PeerJ*, 8, e8817. doi: 10.7717/peerj.8817

Lambert, E. V., Gibson, A. S. C., & Noakes, T. D. (2005). Complex systems model of fatigue: integrative homeostatic control of peripheral physiological systems during exercise in humans. *British Journal of Sports Medicine*, 39(1), 52–62. doi: 10.1136/bjism.2003.011247

Lehmann, E. (1993). *Testing Statistical Hypotheses*. Chapman and Hall.

Lemoine, N. P., Hoffman, A., Felton, A. J., Baur, L., Chaves, F., Gray, J., ... Smith, M. D. (2016). Underappreciated problems of low replication in ecological field studies. *Ecology*, 97(10), 2554–2561. doi: 10.1002/ecy.1506

Lichtenstein, A. V. (2019). Strategies of the War on Cancer: To Kill or to Neutralize? *Frontiers in Oncology*, 8, 667. doi: 10.3389/fonc.2018.00667

Lilienfeld, S. O., Ammirati, R., & David, M. (2012). Distinguishing science from pseudoscience in school psychology: science and scientific thinking as safeguards against human error. *Journal of school psychology*, 50(1), 7–36. doi: 10.1016/j.jsp.2011.09.006

Liu, Y., Sun, Y., Zhu, W., & Yu, J. (2017). The late swing and early stance of sprinting are most hazardous for hamstring injuries. *Journal of Sport and Health Science*, 6(2), 133-136. doi: 10.1016/j.jshs.2017.01.011

Lohse, K., Sainani, K., Taylor, J., Butson, M., Knight, E., & Vickers, A. (2020). Systematic Review of the use of “Magnitude-Based Inference” in Sports Science and Medicine. *Plos One*, 15(6). doi: 10.1371/journal.pone.0235318

López-Valenciano, A., Ruiz-Pérez, I., García-Gómez, A., Vera-García, F. J., De Ste Croix, M., Myer, G. D., & Ayala, F. (2019). Epidemiology of injuries in professional football: A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 54(12), 1–9. doi: 10.1136/bjsports-2018-099577

Low, B., Coutinho, D., Gonçalves, B., Rein, R., Memmert, D., & Sampaio, J. (2019). A Systematic Review of Collective Tactical Behaviours in Football Using Positional Data. *Sports Medicine*, 50(5), 1–43. doi: 10.1007/s40279-019-01194-7

MacDonald, R. (2010). *The inter-individual variability in human muscle strength and in the response to resistance training* (Tesis doctoral). Manchester Metropolitan University, Manchester.

Malliaropoulos, N., Mendiguchia, J., Pehlivanidis, H., Papadopoulou, S., Valle, X., Malliaras, P., & Maffulli, N. (2012). Hamstring exercises for track and field athletes: Injury and exercise biomechanics, and possible implications for exercise selection and primary prevention. *British Journal of Sports Medicine*, 46(12), 846–851. doi: 10.1136/bjsports-2011-090474

Mann, T. N., Lamberts, R. P., & Lambert, M. I. (2014). High responders and low responders: factors associated with individual variation in response to standardized training. *Sports Medicine*, 44(8), 1113–1124. doi: 10.1007/s40279-014-0197-3

McCall, A., Carling, C., Davison, M., Nedelec, M., Le Gall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2015). Injury risk factors, screening tests and preventative strategies: a systematic review of the evidence that underpins the perceptions and practices of 44 football (soccer) teams from various premier leagues. *British Journal of Sports Medicine*, 49(9), 583–589. doi: 10.1136/bjsports-2014-094104

McCall, A., Carling, C., Nedelec, M., Davison, M., Le Gall, F., Berthoin, S., & Dupont, G. (2014). Risk factors, testing and preventative strategies for non-contact injuries in professional football: current perceptions and practices of 44 teams from various premier leagues. *British Journal of Sports Medicine*, 48(18), 1352–1357. doi: 10.1136/bjsports-2014-093439

McKeon, P. O., & Hertel, J. (2006). The dynamical-systems approach to studying athletic injury. *International Journal of Athletic Therapy and Training*, 11(1), 31–33. doi: 10.1123/att.11.1.31

McShane, B. B., Gal, D., Gelman, A., Robert, C., & Tackett, J. L. (2019). Abandon Statistical Significance. *The American Statistician*, 73(sup1), 235–245. doi: 10.1080/00031305.2018.1527253

Meehl, P. E. (1978). Theoretical risks and tabular asterisks: Sir Karl, Sir Ronald, and the slow progress of soft psychology. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 46(4), 806–834. doi: 10.1037/0022-006X.46.4.806

Mendez-Villanueva, A., Suarez-Arrones, L., Rodas, G., Fernandez-Gonzalo, R., Tesch, P., Linnehan, R., ... Di Salvo, V. (2016). MRI-based regional muscle use during hamstring strengthening exercises in elite soccer players. *PLoS One*, 11(9). doi: 10.1371/journal.pone.0161356

Mendiguchia, J., Conceição, F., Edouard, P., Fonseca, M., Pereira, R., Lopes, H., ... Jiménez-Reyes, P. (2020). Sprint versus isolated eccentric training: Comparative effects on hamstring architecture and performance in soccer players. *Plos One*, 15(2). doi: 10.1371/journal.pone.0228283

Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1886). Influence of Motion of the Medium on the Velocity of Light. *American Journal of Science*, 31(185), 377–386.

Mjølsnes, R., Arnason, A., Østhaugen, T., Raastad, T., & Bahr, R. (2004). A 10-week randomized trial comparing eccentric vs. concentric hamstring strength training in well-trained soccer players. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 14(5), 311–317. doi: 10.1046/j.1600-0838.2003.367.x

Mokryn, O., Wagner, A., Blattner, M., Ruppin, E., & Shavitt, Y. (2016). The role of temporal trends in growing networks. *PloS One*, 11(8). doi: 10.1371/journal.pone.0156505

Montull, L., Vázquez, P., Rocas, L., Hristovski, R., & Balagué, N. (2020). Flow as an Embodied State. Informed Awareness of Slackline Walking. *Frontiers in Psychology*, doi: 10.3389/fpsyg.2019.02993

Mueller, S., Wang, D., Fox, M. D., Yeo, B. T. T., Sepulcre, J., Sabuncu, M. R., ... Liu, H. (2013). Individual variability in functional connectivity architecture of the human brain. *Neuron*, 77(3), 586–595. doi: 10.1016/j.neuron.2012.12.028

Newell, K. M., & Valvano, J. (1998). Movement science: therapeutic intervention as a constraint in learning and relearning movement skills. *Scandinavian Journal of Occupational Therapy*, 5(2), 51–57. doi: 10.3109/11038129809035730

Newman, M. E. J. (2009). The first-mover advantage in scientific publication. *EPL (Europhysics Letters)*, 86(6). doi: 10.1209/0295-5075/86/68001

Nietzsche, F. (2016). *Aurora. Reflexiones sobre los prejuicios morales*. Alba Editorial.

Noakes, T. D., & Gibson, A. S. C. (2004). Logical limitations to the “catastrophe” models of fatigue during exercise in humans. *British journal of sports medicine*, 38(5), 648-649. DOI: 10.1136/bjism.2003.009761

Nunn, J. F. (2002). *Ancient Egyptian medicine*. University of Oklahoma Press.

O’Mathúna, D., & Larimore, W. L. (2006). *Alternative medicine: the Christian handbook*. Zondervan.

Okoroha, K. R., Conte, S., Makhni, E. C., Lizzio, V. A., Camp, C. L., Li, B., & Ahmad, C. S. (2019). Hamstring Injury Trends in Major and Minor League Baseball: Epidemiological Findings From the Major League Baseball Health and Injury Tracking System. *Orthopaedic journal of sports medicine*, 7(7). 2325967119861064. doi: 10.1177/2325967119861064

Organización Mundial de la Salud (12 de diciembre de 2020). Diabetes. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diabetes>

Ozuak, A., & Çağlayan, A. (2019). Differential learning as an important factor in training of football technical skills. *Journal of Education and Training Studies*, 7(6), 68-76.

Petersen, J., Thorborg, K., Nielsen, M. B., Budtz-Jørgensen, E., & Hölmich, P. (2011). Preventive effect of eccentric training on acute hamstring injuries in men's soccer: a cluster-randomized controlled trial. *The American Journal of Sports Medicine*, 39(11), 2296–2303. doi: 10.1177/0363546511419277

Pickering, C., & Kiely, J. (2019). Do non-responders to exercise exist—and if so, what should we do about them? *Sports Medicine*, 49(1), 1–7. doi: 10.1007/s40279-018-01041-1

Planck, M., & Tixaire, A. G. (2000). *Autobiografía científica y últimos escritos*. Nivola.

Pol, R., Balagué, N., Ric, A., Torrents, C., Kiely, J., & Hristovski, R. (2020). Training or Synergizing? Complex Systems Principles Change the Understanding of Sport Processes. *Sports Medicine-Open*, 6(1), 1-13.

Pol, R., Hristovski, R., Medina, D., & Balague, N. (2018). From microscopic to macroscopic sports injuries. Applying the complex dynamic systems approach to sports medicine: a narrative review. *British Journal of Sports Medicine*, 53(19), 1214-1220. doi: 10.1136/bjsports-2016-097395

Popper, K. R. (1989). *La lógica de la investigación científica*. Tecnos.

Port, S., Demer, L., Jennrich, R., Walter, D., & Garfinkel, A. (2000). Systolic blood pressure and mortality. *The Lancet*, 355(9199), 175–180. doi: 10.1016/S0140-6736(99)07051-8

Rago, V., Brito, J., Figueiredo, P., Costa, J., Krstrup, P., & Rebelo, A. (2020). Internal training load monitoring in professional football: a systematic review of methods using rating of perceived exertion. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 60(1), 160–171. doi: 10.23736/S0022-4707.19.10000-X

Real Academia Española. (s.f.). Fe. En Diccionario de la lengua española. Recuperado en 1 de diciembre de 2020, de <https://dle.rae.es/fe?m=form>

Renshaw, I., Davids, K., & Savelsbergh, G. J. P. (2010). *Motor learning in practice: A constraints-led approach*. Routledge.

Rose, T. (2016). *The end of average: How to succeed in a world that values sameness*. Penguin UK.

Samuelson, W., & Zeckhauser, R. (1988). Statu quo bias in decision making. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1(1), 7–59.

Seagrave, R. A., Perez, L., McQueeney, S., Toby, E. B., Key, V., & Nelson, J. D. (2014). Preventive effects of eccentric training on acute hamstring muscle injury in professional baseball. *Orthopaedic Journal of Sports Medicine*, 2(6), 2325967114535351. doi: 10.1177/2325967114535351

Seifert, L., & Chollet, D. (2008). Inter-limb coordination and constraints in swimming: a review. *Physical Activity and Children: New Research*, 65–93.

Senn, S. (2001). Two cheers for P-values? *Journal of Epidemiology and Biostatistics*, 6(2), 193–204. doi: 10.1080/135952201753172953

Shephard, R. J., Rankinen, T., & Bouchard, C. (2004). Test-retest errors and the apparent heterogeneity of training response. *European journal of applied physiology*, 91(2-3), 199–203. doi: 10.1007/s00421-003-0990-4

Shinbrot, T., Grebogi, C., Wisdom, J., & Yorke, J. A. (1992). Chaos in a double pendulum. *American Journal of Physics*, 60(6), 491–499. doi: 10.1119/1.16860

Silvers-Granelli, H., Mandelbaum, B., Adeniji, O., Insler, S., Bizzini, M., Pohlig, R., ... Dvorak, J. (2015). Efficacy of the FIFA 11+ injury prevention program in the collegiate male soccer player. *The American Journal of Sports Medicine*, 43(11), 2628–2637. doi: 10.1177/0363546515602009

Skipper, J. K., Jr., Guenther, A. L., & Nass, G. (1967). The Sacredness of .05: A Note concerning the Uses of Statistical Levels of Significance in Social Science. *The American Sociologist*, 16-18. doi.org/10.2307/27701229

Slapšinskaite, A., Hristovski, R., Razon, S., Balagué, N., & Tenenbaum, G. (2017). Metastable pain-attention dynamics during incremental exhaustive exercise. *Frontiers in Psychology*. doi: 10.3389/fpsyg.2016.02054

Smaldino, P. E., & McElreath, R. (2016). The natural selection of bad science. *Royal Society Open Science*, 3(9), 160384. doi: 10.1098/rsos.160384. eCollection 2016 Sep

Stegenga, J. (2011). Is meta-analysis the platinum standard of evidence? *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, *ScienceDirect*, 42(4), 497–507. doi: 10.1016/j.shpsc.2011.07.003

Sturmberg, J. P. (2019). Evidence-based medicine—Not a panacea for the problems of a complex adaptive world. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 25(5), 706–716. doi: 10.1111/jep.13122

Sturmberg, J., & Topolski, S. (2014). For every complex problem, there is an answer that is clear, simple and wrong: And other aphorisms about medical statistical fallacies. *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 20(6), 1017–1025. doi: 10.1111/jep.12156

Taleb, N. A. (2013). *Paidós Transiciones*. Espasa Libros.

Taleb, N. N. (2019). *The Statistical Consequences of Fat Tails*. STEM Publishing.

Tassignon, B., Verschueren, J., Delahunt, E., Smith, M., Vicenzino, B., Verhagen, E., & Meeusen, R. (2019). Criteria-based return to sport decision-making following lateral ankle sprain injury: a systematic review and narrative synthesis. *Sports Medicine*, 49(4), 601–619. doi: 10.1007/s40279-019-01071-3

Taylor, H. L., Buskirk, E., & Henschel, A. (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *Journal of Applied Physiology*, 8(1), 73–80. doi: 10.1152/jappl.1955.8.1.73

Torrents Martín, C., Ric, Á., & Hristovski, R. (2015). Creativity and emergence of specific dance movements using instructional constraints. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*, 9(1), 65. doi: 10.1037/a0038706

Torrents, C., Balagué, N., Ric, Á., & Hristovski, R. (2020). The motor creativity paradox: Constraining to release degrees of freedom. *Psychology of Aesthetics, Creativity, and the Arts*. doi: 10.1037/aca0000291

Van der Kamp, J., Withagen, R., & Orth, D. (2019). On the Education About/of Radical Embodied Cognition. *Frontiers in Psychology*. doi: 10.3389/fpsyg.2019.02378

Van Dyk, N., Behan, F. P., & Whiteley, R. (2019). Including the Nordic hamstring exercise in injury prevention programmes halves the rate of hamstring injuries: a systematic review and meta-analysis of 8459 athletes. *British Journal of Sports Medicine*, 53(21), 1362–1370. doi: 10.1136/bjsports-2018-100045

Vaughan, J., Mallett, C. J., Davids, K., Potrac, P., & López-Felip, M. A. (2019). Developing Creativity to Enhance Human Potential in Sport: A Wicked Transdisciplinary Challenge. *Frontiers in Psychology*, 10, 2090. doi: 10.3389/fpsyg.2019.02090

Venhorst, A., Micklewright, D. P., & Noakes, T. D. (2018). The psychophysiological determinants of pacing behaviour and performance during prolonged endurance exercise: A performance level and competition outcome comparison. *Sports Medicine*, 48(10), 2387-2400. doi:10.1007/s40279-018-0893-5

Wasserstein, R. L., & Lazar, N. A. (2016). *The ASA statement on p-values: context, process, and purpose*. Taylor & Francis.

Weinberg, R. A., & Weinberg, R. A. (2013). *The biology of cancer*. Garland science.

Weir, A., Rabia, S., & Arden, C. (2016). Trusting systematic reviews and meta-analyses: all that glitters is not gold!. *British Association of Sport and Exercise Medicine*, 50(18), 1100-1101. doi: 10.1136/bjsports-2015-095896

Whipple, M. O., Schorr, E. N., Talley, K., Lindquist, R., Bronas, U. G., & Treat-Jacobson, D. (2018). Variability in Individual Response to Aerobic Exercise Interventions Among Older Adults. *Journal of aging and physical activity*, 26(4), 655–670. doi: 10.1123/japa.2017-0054

Whiteley, R. (2016). 'Moneyball' and time to be honest about preseason screening: it is a sham making no inroads on the 1 billion dollar injury costs in baseball. *British Journal of Sports Medicine*, 50(14), 835 – 836. doi: 10.1136/bjsports-2014-094541

Wikstrom, E. A., Hubbard-Turner, T., & McKeon, P. O. (2013). Understanding and treating lateral ankle sprains and their consequences. *Sports Medicine*, 43(6), 385–393. doi: 10.1007/s40279-013-0043-z

Williamson, P. J., Atkinson, G., & Batterham, A. M. (2018). Inter-individual differences in weight change following exercise interventions: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Obesity reviews: an official journal of the International Association for the Study of Obesity*, 19(7), 960–975. doi: 10.1111/obr.12682

Worthley, D. L., & Leggett, B. A. (2010). Colorectal cancer: molecular features and clinical opportunities. *The Clinical Biochemist Reviews*, 31(2), 31-38.

