

apunts

MEDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



REVISIÓN

Análisis de los factores de riesgo neuromusculares de las lesiones deportivas

Azahara Fort Vanmeerhaeghe^{a,b,*} y Daniel Romero Rodríguez^a

^a Escola Universitària de la salut i l'esport (EUSES), Universitat de Girona, Girona, España

^b Facultat de Psicologia, Ciències de l'Educació i de l'Esport Blanquerna, Universitat Ramon Llull, Barcelona, Espanya

Recibido el 21 de enero de 2013; aceptado el 14 de mayo de 2013

PALABRAS CLAVE

Factores de riesgo;
Lesiones deportivas;
Prevención;
Sistema
neuromuscular

KEYWORDS

Risk factors;
Sports injury;
Prevention;
Neuromuscular
system

Resumen La actividad física, y especialmente el deporte de competición, se encuentran continuamente bajo la influencia de una incidencia lesiva difícil de disminuir. Este artículo realiza una revisión bibliográfica sobre los diferentes factores de riesgo neuromuscular que predisponen a los deportistas a padecer una mayor incidencia lesiva, en especial en los deportes en los que predominan saltos, cambios de dirección y variaciones de velocidad (aceleraciones y desaceleraciones). La literatura científica actual destaca, entre otros, la fatiga muscular, la alteración de la magnitud y de los tiempos de activación muscular, la alteración de la capacidad de coactivación muscular, la estrategia de control de la extremidad inferior predominante en el plano frontal, los desequilibrios neuromusculares entre pierna dominante y no dominante, la inadecuada *stiffness* muscular, los déficits en el control postural, la disminución de la propiocepción, los déficits de *core* y la disminución en los mecanismos de anticipación. El análisis de estos factores de riesgo proporciona una guía práctica a la hora de diseñar tareas dentro de un plan de prevención adecuado a cada tipo de especialidad deportiva, y será útil tanto para entrenadores y preparadores físicos como para fisioterapeutas.

© 2013 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Neuromuscular risk factors of sports injury

Abstract Physical activity and especially competitive sports are continuously affected by a high incidence of injury, which is difficult to reduce. This article reviews the literature on the different neuromuscular risk factors predisposing athletes to suffer a higher incidence of injury, especially in those sports where jumps, changes of direction and high speed changes (acceleration and deceleration) dominate. The current literature emphasizes the following injury risk factors related to control of the neuromuscular system: muscle fatigue, changes in the intensity and time of muscle activation, decreased muscle coactivation, increased dynamic knee valgus, inappropriate muscle stiffness, deficits in postural stability, impaired proprioception, core deficits, neuromuscular imbalances between dominant and non-dominant leg, and

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: azaharafort@gmail.com (A. Fort Vanmeerhaeghe).

decreased feedforward mechanism. The analysis of these risk factors provides a practical guide for the design of prevention programs for each type of sport, and will be useful for coaches, physical trainers and physiotherapists.

© 2013 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L. All rights reserved.

Introducción

El correcto funcionamiento del complejo sistema neuromuscular ejerce un papel clave en el control de la estabilidad articular. Es importante tener en cuenta este hecho desde diferentes ámbitos relacionados con el deporte (fig. 1): aumento del rendimiento deportivo, prevención de lesiones y readaptación a la competición deportiva tras una lesión¹⁻³.

Actualmente existen diferentes trabajos que han mostrado como el entrenamiento neuromuscular ha conseguido mejorar diferentes capacidades relacionadas con este sistema, como son la sensación de posición y movimiento articular, los patrones de activación muscular y cualidades físicas como la fuerza y el equilibrio⁴⁻⁷. Además, en los últimos tiempos son múltiples los trabajos que han conseguido reducir el número de algunas lesiones deportivas gracias a un entrenamiento del control neuromuscular⁸⁻¹⁰. Actualmente no existe consenso sobre qué tipo de entrenamiento neuromuscular es el más adecuado, aunque si tenemos en cuenta el principio de especificidad, cada grupo de población necesitará un tipo de entrenamiento adecuado a sus características y exigencias deportivas. Antes de diseñar cualquier programa de entrenamiento de este tipo es importante entender el concepto de control neuromuscular en su amplio significado. La figura 2 explica la estrecha relación que existe entre dicho concepto y los términos «entrenamiento», «estabilidad articular» y «sistema sensoriomotor»^{2,6,11}.

El control del sistema neuromuscular depende directamente del complejo sistema sensoriomotor. Este sistema incorpora todos los receptores y vías aferentes, el proceso de integración y de procesamiento central y las respuestas eferentes, con el objetivo de mantener la estabilidad funcional de la articulación durante los movimientos deportivos¹². En relación con el proceso neurosensorial, pese a que el sistema visual y el vestibular contribuyen de manera importante en el control neuromuscular, los mecanorreceptores periféricos (especialmente los receptores musculares)

han sido descritos como las estructuras más modificables mediante el entrenamiento deportivo^{2,13}. Esta información aferente es procesada e integrada a partir de 3 niveles de control motor (médula espinal, tronco cerebral y corteza cerebral) y se asocia a diversas áreas, como el cerebelo. En función del nivel de control motor escogido podrán darse 3 tipos de respuestas motoras: muy rápidas (respuesta refleja, médula espinal), intermedias (automáticas, tronco del encéfalo) y más lentas (más elaboradas, voluntarias, corteza cerebral). Estas respuestas vendrán reguladas por 2 mecanismos de control motor, propios de todo individuo y que pueden desarrollarse mediante el entrenamiento. Dichos mecanismos, conocidos en lengua anglosajona como *feedback* y *feedforward*, se desarrollan de manera continua a partir de las experiencias motrices^{2,3,13}. El control *feedback* se refiere a la respuesta proporcionada bien por vía refleja o bien después del análisis de un determinado estímulo sensorial. Por otra parte, los mecanismos de control *feedforward* son descritos como las acciones de anticipación o preactivación que ocurren antes de la detección sensorial de una disrupción de la homeostasis y que se basan en experiencias anteriores.

Por último, también es importante diferenciar entre el concepto de propiocepción y control neuromuscular, ambos integrados dentro del sistema sensoriomotor². A partir de las diferentes definiciones que podemos encontrar en la literatura científica^{1,2,13,14}, en esta revisión definiremos propiocepción como el tipo de sensibilidad del sistema somatosensorial que tiene como principal objetivo participar en el mantenimiento de la estabilidad dinámica de la articulación, lo que se consigue mediante la detección de las variaciones de presión, tensión y longitud de los diferentes tejidos articulares y musculares¹⁵. Por otra parte, el control neuromuscular, término central de esta revisión, se define como la activación muscular precisa que posibilita el desarrollo coordinado y eficaz de una acción¹⁵.

Con el objetivo de diseñar planes de entrenamiento neuromuscular óptimos en los diferentes ámbitos del deporte, especialmente en el de prevención y readaptación de lesiones deportivas, será de vital importancia analizar los diferentes factores de riesgo relacionados con el sistema sensoriomotor y el correcto funcionamiento del control neuromuscular.

El objetivo principal del presente estudio es realizar una revisión de la bibliografía científica actual sobre los diferentes factores de riesgo de origen neuromuscular que predisponen a los deportistas a sufrir una mayor incidencia lesiva de la extremidad inferior. En especial, el texto se basa en los deportes en los que predominan las recepciones de saltos, los cambios de dirección y las situaciones de aceleración y desaceleración.

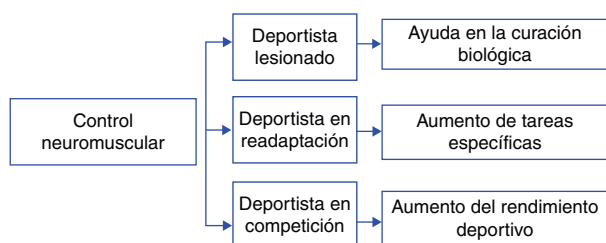


Figura 1 Ámbitos de aplicación del entrenamiento del control neuromuscular con relación al deporte.

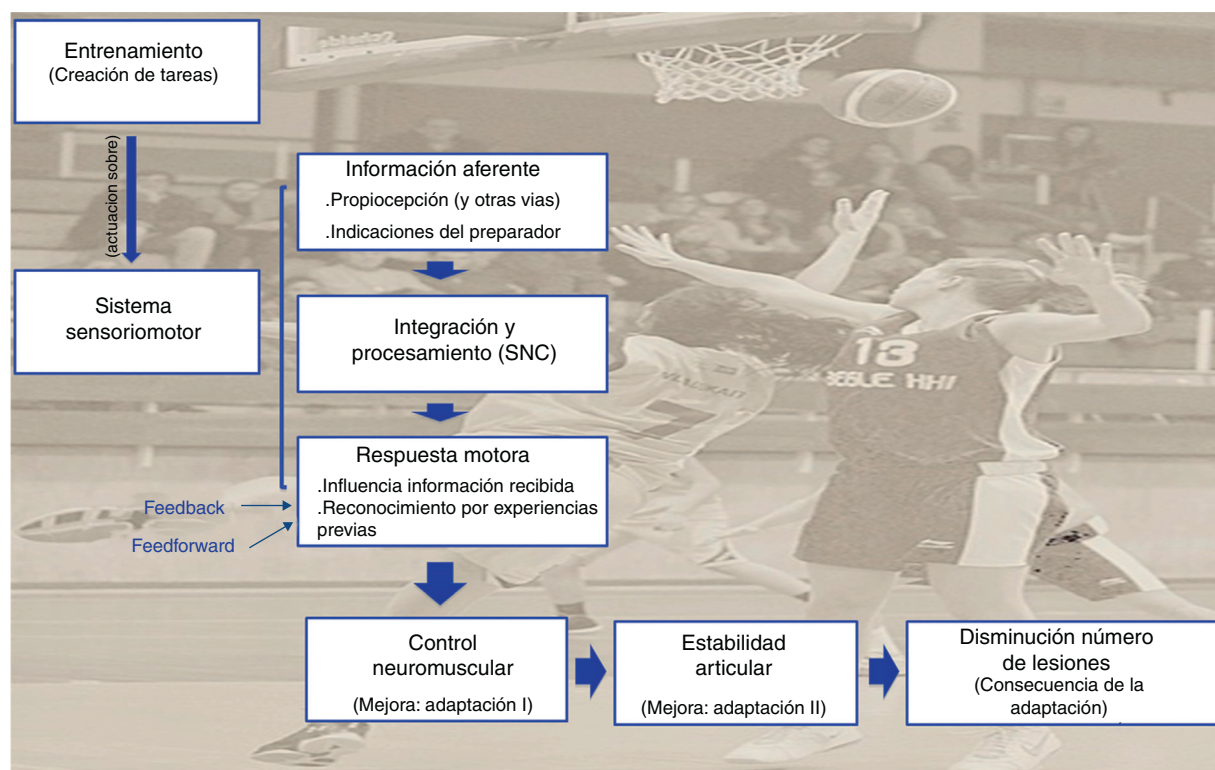


Figura 2 Relación entre los conceptos de entrenamiento, sistema sensoriomotor, estabilidad articular y control neuromuscular en la prevención de lesiones.

Material y métodos

La revisión bibliográfica se realizó principalmente en la base de datos PUBMED hasta mayo de 2012. Los principales algoritmos de búsqueda utilizados fueron: «neuromuscular risk factors AND sport», «neuromuscular risk factors AND athletes» y «sports injury risk factors». También se examinaron las listas de referencias de los artículos escogidos. Solo se incluyeron los artículos en lengua española o anglosajona.

Incidencia lesiva y control neuromuscular

Es conocida la gran incidencia lesiva en el deporte de competición^{16,17}. Entre algunas de las lesiones con mayor presencia podemos destacar la rotura del ligamento cruzado anterior (LCA) y la rotura del ligamento lateral del tobillo. Estos casos pueden asociarse a un aumento de la morbilidad en el deporte (p. ej., artrosis prematura de la rodilla) y discapacidad a largo plazo^{18,19}. Es importante destacar que este tipo de lesiones articulares son las que más pueden beneficiarse del entrenamiento del control neuromuscular¹⁰.

Una de las clasificaciones más genéricas de los factores de riesgo de lesiones deportivas divide a estos en intrínsecos y extrínsecos¹⁶. Como factores extrínsecos se incluyen, entre otros, el equipamiento utilizado y las condiciones ambientales existentes en un entrenamiento o competición. Por otro lado, entre los factores intrínsecos podemos enumerar la edad, el sexo, la composición corporal y las características anatómicas de determinadas estructuras, aunque también se relacionan otros más vinculados a las capacidades físicas

del deportista, como pueden ser la falta de fuerza y una pobre capacidad coordinativa. Sin dejar de lado la clasificación comentada, es importante destacar, con relación a la presente revisión, que la lesión del LCA sin contacto permite clasificar los factores de riesgo en 4 categorías: ambiental, anatómica, hormonal y neuromuscular; esta última, según la bibliografía científica actual, es considerada como la más influenciada por el entrenamiento²⁰. Dado que el origen de las lesiones deportivas es habitualmente multifactorial, la primera estrategia de prevención ha de consistir en realizar un análisis previo de todos estos factores^{17,21}.

A continuación nos centraremos en nuestro motivo principal de estudio, el control neuromuscular, el cual depende a su vez de diversos factores de riesgo intrínsecos que pueden ser modificables con el entrenamiento, tal y como ya hemos apuntado. La lesión deportiva por mecanismo sin contacto más estudiada en la literatura científica es la rotura del LCA. Es por este motivo que nos centraremos mayoritariamente en esta lesión como ejemplo para explicar la implicación del sistema neuromuscular en la prevención de lesiones de la extremidad inferior⁹.

Lesiones deportivas de la extremidad inferior: factores de riesgo neuromuscular

En la [tabla 1](#) se establece una clasificación de los principales factores de riesgo neuromuscular asociados a lesiones en el deporte.

Estos factores de riesgo neuromuscular tienen un denominador común: la alteración del patrón de movimiento

Tabla 1 Factores neuromusculares de riesgo de lesión de la extremidad inferior

Fatiga neuromuscular

Alteración de la intensidad y del tiempo de activación muscular

Tiempo de reacción de la musculatura peroneal
Desequilibrios en la activación de los músculos mediales y laterales de cuádriceps e isquiosurales
Mayor activación de la musculatura cuádriceps versus la isquiosural
Déficits en la activación muscular de la cadera
Déficits en la estabilidad y activación muscular del tronco

Alteración de la capacidad de coactivación muscular

Estrategia de control dinámico de la extremidad inferior:
predominancia en el plano frontal respecto al sagital
Aumento del valgo dinámico de rodilla

Desequilibrios neuromusculares entre pierna dominante y no dominante

Inadecuada stiffness muscular

Déficits del control de la estabilidad postural

Alteración de la sensibilidad propioceptiva

Disminución de los mecanismos de anticipación o preactivación (feedforward)

(fig. 3). El patrón de movimiento, referido a la secuencia de activación muscular utilizada para generar una acción, ha sido estudiado en deportistas para ver su posible relación con la aparición de ciertas lesiones, sobre todo en las extremidades inferiores. Este ámbito de estudio se ha focalizado especialmente en detectar posibles diferencias entre las acciones desarrolladas entre hombres y mujeres, y a pesar de que existe alguna publicación que resalta la similitud de incidencia lesiva entre géneros²², son diversos los estudios que hablan de un mayor número de lesiones en las mujeres deportistas^{9,23,24}. De esta manera, se sabe que las lesiones articulares de rodilla y tobillo predominan en mujeres¹⁷, y más concretamente se detalla una mayor incidencia lesiva de afecciones como el dolor anterior de rodilla²⁴, las roturas del LCA^{25,26} y los esguinces de grado I del ligamento lateral del tobillo²⁷.

La literatura especializada identifica las hormonas sexuales, la anatomía de la mujer y los desequilibrios neuromusculares (ejemplos son los déficits en el control postural, la propiocepción o la fuerza de la musculatura de la cadera) como principales factores intrínsecos que explican la mayor incidencia de lesiones en el sexo femenino^{9,23}. Además, se debe tomar especial precaución en deportistas jóvenes, ya que esta población se asocia a un mayor número de lesiones del LCA, especialmente en adolescentes que practican deportes con abundantes cambios de dirección como son el fútbol, el baloncesto y el balonmano^{25,26,28,29}. Por tanto, es especialmente importante el análisis de los factores de riesgo en la fase puberal, ya que se dan cambios muy significativos a nivel anatómico y hormonal que no siempre van asociados a una mejora del control neuromuscular. De forma concreta, es importante tener en cuenta que los cambios musculoesqueléticos producidos pueden alterar la laxitud de



Figura 3 Relación entre la alteración del patrón de movimiento con diferentes factores de riesgo neuromuscular. (Foto extraída de «masBasket».)

las estructuras articulares pasivas, provocando una disminución de la estabilidad dinámica de la articulación⁹.

A continuación se analizan los diferentes factores que relacionan la incidencia lesiva con la alteración de los patrones de movimiento, es decir, con la forma en que los deportistas organizan la programación y la ejecución de las acciones deportivas.

Fatiga neuromuscular

La fatiga, entendida desde hace años como un proceso en el cual se produce una disminución progresiva de la capacidad de generar potencia³⁰, provoca una alteración en la capacidad de control neuromuscular del deportista. Diversos estudios han registrado que después de un ejercicio fatigante y durante las recepciones de diferentes tipos de saltos, tanto en hombres como en mujeres, se produce un cambio en las estrategias de control neuromuscular utilizadas por estos sujetos³¹⁻³⁴. Estas variaciones en el control motor se asocian a diferentes factores de riesgo de lesión, tales como una menor flexión de rodilla y cadera, un aumento del valgo de rodilla, una mayor fuerza de reacción del suelo y la necesidad de un mayor tiempo de estabilización³⁴⁻³⁶.

En relación con la lesión del LCA, diferentes estudios muestran que un ejercicio fatigante puede llevar a algunas de las variaciones descritas de control motor, hecho que puede aumentar el mecanismo de cizallamiento anterior tibial y, por tanto, provocar un incremento de tensión y posible lesión del LCA, tanto en hombres como en mujeres^{32,33}. En esta línea, Small et al.³⁷ observaron que en la fase final de una simulación de un partido de fútbol disminuía el momento pico de fuerza de la musculatura isquiosural. Según estos autores, este cambio indica una disminución de la estabilidad articular de la rodilla, provocándose una alteración en el control motor y, por tanto, un mayor riesgo de lesión articular. Simultáneamente a este hecho, estos mismos autores destacan la mayor predisposición a lesiones de esta musculatura, especialmente en acciones de sprint. Con relación a este hecho, el citado trabajo destaca el déficit de fuerza excéntrica, sobre todo después de ejercicios fatigantes, como un factor de riesgo de lesión de la musculatura isquiosural.

Además de estas variaciones relacionadas con la rodilla, es destacable el efecto del ejercicio fatigante en el tobillo, alterando la sensación de posición articular de esta estructura y la activación de la musculatura peroneal. Estos hechos pueden favorecer el riesgo de lesión de la articulación del tobillo^{38,39}.

Alteración de la intensidad y del tiempo de activación muscular

Existen numerosos estudios, realizados mayoritariamente mediante electromiografía, que muestran como la alteración de la magnitud y el tiempo de activación muscular durante diferentes acciones deportivas pueden predisponer a una mayor incidencia lesiva. A continuación hablaremos de algunos de los casos mayormente descritos por la bibliografía actual.

Tiempo de reacción de la musculatura peroneal

Es importante destacar el estudio de Menacho et al.⁴⁰, los cuales realizaron una revisión sistemática con el objetivo de comparar el tiempo de reacción de la musculatura peroneal en tobillos sanos versus lesionados. Para este fin se evaluó de forma electromiográfica la reacción de la musculatura citada durante un test que consistía en una inversión repentina del tobillo. Los autores registran un mayor tiempo de reacción de la musculatura peroneal en los tobillos lesionados respecto a los tobillos sanos. Ese mismo año, otro grupo de investigadores revisó de forma sistemática los estudios que relacionaban a los diferentes componentes del sistema sensoriomotor con la inestabilidad funcional del tobillo. Estos autores concluyeron que no existe evidencia sobre la relación entre un menor tiempo de reacción de la musculatura peroneal y la inestabilidad funcional del tobillo, pese a que sí se relaciona con déficits en el control postural y la sensación de posición articular del tobillo⁴¹.

Desequilibrios en la activación de los músculos mediales y laterales de cuádriceps e isquiosurales

Los desequilibrios entre la parte medial y lateral de la musculatura han sido descritos como factores de riesgo de lesión, y este dato ha sido registrado especialmente en la

musculatura cuádricepal⁴² e isquiosural⁴³. De esta manera, Myer et al.⁴² estudiaron el patrón de activación del cuádriceps en una posición de riesgo de lesión del LCA en ambos sexos. Los resultados muestran que las mujeres, a diferencia de los hombres, activan en mayor proporción la parte lateral del cuádriceps, estrategia de activación que contribuye al valgo dinámico de rodilla y facilita la rotura del LCA, especialmente si se asocia un predominio de activación de la parte lateral de la musculatura isquiosural^{25,43}.

En relación con el síndrome de dolor femorrotuliano, diversos estudios muestran que una menor magnitud y un mayor tiempo de activación muscular del vasto medial respecto al vasto lateral se asocian a una mayor incidencia de este tipo de lesión^{24,44-46}.

Mayor activación de la musculatura cuádricepal versus la isquiosural

Hay varios trabajos que identifican como factor de riesgo de lesión del LCA una activación excesivamente predominante del cuádriceps en las acciones de recepción del salto y/o cambios de dirección y aceleración^{1,20,25} respecto a los isquiotibiales. La alta actividad de los cuádriceps con la menor activación de los isquiosurales, especialmente en acciones excéntricas, puede producir importantes desplazamientos anteriores de la tibia. Tal y como hemos comentado, diferentes autores demuestran que las mujeres tienden a activar preferentemente los extensores de rodilla respecto a los flexores cuando se necesita dar estabilidad articular en los movimientos deportivos^{1,20,47,48}. Este hecho acentuará y perpetuará posibles desequilibrios de fuerza y de activación de dichos músculos.

Déficits en la activación muscular de la cadera

Los déficits de la activación muscular de la cadera se han asociado con un mayor número de lesiones, tales como el síndrome de dolor femorrotuliano^{24,49}, la lesión del LCA^{48,50} y el síndrome de la cintilla iliotibial⁵¹.

Prins y Van der Wurff⁴⁹ realizaron una revisión sistemática sobre la relación que existe entre la debilidad de la musculatura de la cadera y el síndrome de dolor femorrotuliano en mujeres. Los autores concluyen que existe evidencia de la fuerte relación existente entre dicho síndrome y el déficit de fuerza de los músculos extensores, rotadores externos y abductores de cadera al compararse con mujeres sanas.

Además del problema existente en el aparato extensor, es destacable la mayor incidencia de lesión del LCA en el sexo femenino durante los cambios de dirección y recepciones de saltos. En estas acciones, además de producirse mayor valgo dinámico y rotación externa de la rodilla, tiene lugar una mayor aducción y rotación interna de la cadera^{48,50,52}, y a estos hechos se añade una mayor pronación del pie⁴⁸. Como ya hemos comentado, la alteración de la activación muscular proximal de la cadera se relaciona con un mayor valgo dinámico en las mujeres durante las acciones de recepción^{48,53}. En relación al hecho anterior, Zazulak et al.⁴⁸ compararon los patrones de activación muscular en la recepción del salto unipodal entre hombres y mujeres. Sus resultados muestran que las mujeres disminuyen la activación del glúteo mayor y aumentan la del recto femoral durante la recepción. Esta mayor implicación del cuádriceps lleva a un aumento del deslizamiento tibial anterior, lo que puede contribuir a una

mayor predisposición del sexo femenino a sufrir una lesión de LCA por un mecanismo sin contacto.

El trabajo de Leetun et al.⁵⁴ también se encuentra en esta línea, y en él se observó que los deportistas que registraron menor número de lesiones de la espalda y de la extremidad inferior fueron los que presentaron mayores niveles de fuerza de los abductores y rotadores externos de cadera. Está claro, pues, que la debilidad del glúteo medio es uno de los factores que predispone al deportista a sufrir una lesión, pero es además muy importante destacar el rol tan importante que desarrolla el glúteo mayor, el cual es el principal extensor y además un rotador externo y abductor considerable en la cadera. La acción muscular excéntrica de este músculo tendrá un papel relevante en el control de la ya constatada rotación interna excesiva de la cadera en mujeres. Además, la musculatura proximal de esta articulación, especialmente el conjunto de los glúteos, tendrá un gran papel en el posicionamiento de la extremidad inferior y en la capacidad de absorber energía durante las acciones de recepción⁴⁸. Relacionado con esto último, es importante destacar el rol importantísimo de los músculos de la cadera tanto en la transferencia de la fuerza de la extremidad inferior a la pelvis y la columna como en la estabilización del tronco y de la pelvis⁵⁵. Como veremos en apartados posteriores, y en relación con el déficit de la musculatura del tronco y de la pelvis, este también se asocia con un factor de riesgo de lesión de la extremidad inferior⁵⁶.

Déficits en la estabilidad y activación muscular del tronco

En los últimos años el déficit del sistema sensoriomotor de la zona, conocida con el término anglosajón *core*, se ha asociado con un mayor riesgo de lesión de las extremidades inferiores^{28,54,55}.

El concepto de *core* como zona anatómica incluye las estructuras pasivas de la pelvis y la columna toracolumbar y la musculatura del tronco como sistema activo⁵⁷. Más concretamente, Akuthota y Nadler⁵⁸ describen tal concepto como una caja donde se encuentra la musculatura abdominal en la parte anterior, los glúteos y los paravertebrales en la parte posterior, el diafragma como techo y la musculatura del suelo pélvico y la cintura pélvica en la zona inferior. Kibler et al.⁵⁶ incluyen la columna, la cadera y la pelvis como estructuras óseas y articulares, y además de la musculatura abdominal, añaden también la musculatura proximal de la extremidad inferior, hecho que destaca la importante interacción entre esta zona y las extremidades.

Actualmente no existe una definición universal del concepto de estabilidad de *core*. Kibler et al.⁵⁶ la definen como la habilidad para controlar la posición y el movimiento del tronco por encima de la pelvis y las extremidades inferiores. Además, tiene el objetivo de permitir la producción óptima de fuerza así como su transferencia y control a los segmentos distales que contribuyen de manera integrada en las cadenas cinéticas utilizadas en los movimientos deportivos. Leetun et al.⁵⁴ se refieren a la estabilidad del *core* como el producto entre el control motor y la capacidad muscular del complejo lumbar-pelvis-cadera. Este concepto enfatiza la importancia de la coordinación en adición a la fuerza y la resistencia de esta zona.

La forma mediante la cual un déficit en el control de tronco puede influir negativamente en la estabilidad de la extremidad inferior ha sido detallada en diferentes trabajos. De esta manera se ha visto, por ejemplo, que la alteración en el control del tronco puede llevar a un aumento del valgo de rodilla, predisponiendo a esta articulación a sufrir mayores tensiones mecánicas^{57,59}. En esta línea, Zazulak et al.⁵⁷ observaron que la disminución de la propiocepción y del control neuromuscular del tronco podían predecir un mayor riesgo de lesiones de la rodilla en las mujeres, aunque no registraron esta relación en los hombres estudiados. Este hecho nos enlaza con la ya comentada mayor alteración propioceptiva en mujeres en comparación con el género masculino.

Si seguimos la secuencia de razonamiento del párrafo anterior, Myer et al.²⁸ identifican el *core* corporal como un modulador crítico de la alineación de la extremidad inferior y de las cargas sufridas sobre esta durante las acciones dinámicas. De esta manera, resulta muy interesante que sugieran que un déficit de preactivación de la musculatura del tronco y de los estabilizadores de cadera puede aumentar las posiciones o movimientos laterales del tronco y llevar así a un incremento de las cargas de abducción sobre la rodilla. Está claro que aunque esta relación descrita en el plano frontal es muy plástica, no es la única que se produce, de forma que los mismos autores destacan que los déficits de control en el tronco pueden aumentar los mecanismos de lesión del LCA, especialmente en mujeres deportistas.

Según lo comentado en este punto, la suma de un déficit en el control de tronco (alteración del concepto *core*) al género femenino produce un aumento importante de la posibilidad de sufrir una lesión de la extremidad inferior. Si a estos 2 hechos sumamos una edad situada en la fase puberal, el riesgo lesivo aumenta. Esta circunstancia viene producida por un aumento de las estructuras óseas, de la altura y de la masa corporal en estas edades, y estos acontecimientos no siempre se asocian con un aumento de la fuerza y del reclutamiento de la musculatura de la cadera y del tronco. Toda esta situación puede dificultar el control del movimiento del tronco durante las acciones dinámicas, y este es uno de los hechos que se asocia con el mayor valgo dinámico observado en las mujeres adolescentes durante las acciones deportivas intensas²⁸, tal como hemos comentado anteriormente.

Alteración de la capacidad de coactivación muscular

La coactivación de la musculatura cuadricepsal e isquiosural puede proteger la articulación de la rodilla, y no solo contra el exceso de desplazamiento anterior tibial, sino también contra el valgo dinámico de la extremidad inferior^{59,60}. Este efecto protector tiene lugar gracias al aumento de estabilidad articular que se produce en la activación simultánea de la musculatura agonista-antagonista alrededor de la rodilla, y es importante comprender que los déficits de fuerza y de tiempo para conseguir una activación máxima de la musculatura isquiosural limitarán la posibilidad de coactivación muscular y, por tanto, el efecto de protección comentado^{11,61}.

Lloyd et al.⁶² estudiaron los diferentes patrones musculares creados durante los momentos de aducción y abducción

de la rodilla en los cambios de dirección, los cuales se asocian a situaciones de alto riesgo de lesión. A pesar de que las desviaciones de la pierna en el plano frontal son tratadas de manera específica en este texto, es importante destacar que estos autores concluyeron que la estrategia neuromuscular que soporta mejor estos momentos producidos en la rodilla se consigue mediante una coactivación de la musculatura cuadricepsal e isquiosural.

Según lo comentado en los 2 párrafos anteriores, hemos de entender que el efecto de coactivación alrededor de la rodilla facilita la protección de esta articulación en las acciones deportivas desarrolladas con preferencia tanto en el plano sagital como frontal.

Estrategia de control dinámico de la extremidad inferior: predominancia en el plano frontal respecto al sagital

Diversas investigaciones han mostrado que las mujeres, en comparación con los hombres, tienen una peor estrategia de control dinámico de la extremidad inferior. Las deportistas tienden a priorizar un control de la extremidad inferior basado en el plano frontal, es decir, intentan absorber la posible energía lesiva propia de los apoyos y las recepciones mediante adaptaciones corporales en dicho plano (valgo dinámico de rodilla). Se sabe que esta estrategia está equivocada debido a que es ineficaz en su intención de minimizar las fuerzas de reacción del suelo^{1,63-65}.

En esta línea, Lephart et al.⁵⁰ observaron que el género femenino tiene una menor capacidad de absorber las fuerzas verticales de impacto tras el salto, lo que correlacionaron con una menor flexión y control de la rodilla en la recepción y con una debilidad de la musculatura cuadricepsal e isquiosural.

Igualmente, el grupo de Wikstrom et al.⁶⁵ también observó que las mujeres absorbían de forma menos eficaz las fuerzas de reacción del suelo, y lo relacionaron también con una menor flexión de rodilla. A pesar de estos resultados, las mujeres obtuvieron un mejor índice de control postural dinámico en comparación con los hombres, hecho que no está directamente relacionado con la capacidad de absorción de una potencial energía lesiva.

En este sentido, Nyland et al.⁶⁶ estudiaron cómo los sujetos con mayor valgo o varo de rodilla en el plano frontal durante el equilibrio unipodal desarrollan diferentes estrategias neuromusculares, las cuales pueden predisponer a un mayor riesgo de lesión de la extremidad inferior.

Por último dentro de este punto, es importante destacar el trabajo de Ford et al.⁶⁷, en el que se compararon las diferencias de género en los parámetros cinemáticos producidos en cambios de dirección inesperados en deportistas adolescentes. En este trabajo los autores también registraron en el género femenino un mayor incremento de los ángulos de rodilla y tobillo en el plano frontal en comparación con los chicos, hecho que podría explicar la mayor incidencia lesiva en las jóvenes deportistas.

Aumento del valgo dinámico de la rodilla

Muy relacionado con el punto anterior, y en parte como consecuencia de este, es importante destacar la existencia del mencionado valgo dinámico de rodilla como una alteración

en la estrategia de control neuromuscular durante acciones deportivas. Con relación a este hecho, es importante diferenciar el llamado valgo anatómico del valgo dinámico al que nos referimos. Como muestran los resultados de McLean et al.⁶³, los sujetos con mayor valgo anatómico detectado en una exploración estática no se correlacionan con un mayor valgo en acciones dinámicas como la salida abierta, el salto lateral o la recepción del salto unipodal. Según los resultados de este estudio, puede deducirse que el valgo funcional durante las acciones deportivas tiene más bien un origen centrado en la estrategia neuromuscular desarrollada que una justificación anatómica.

Este valgo dinámico, el cual se asocia con una estrategia de control motor en el plano frontal, podría ser secundario a una disminución de la función de los abductores de cadera⁵³. El aumento del valgo de rodilla y rotación externa de la tibia, junto con una aducción y rotación interna de cadera, se pueden asociar tanto a lesiones agudas de rodilla (Ireland et al.⁶⁸, con su concepto de «posición de no retorno») como a lesiones crónicas^{24,48,49}.

Desequilibrios neuromusculares entre pierna dominante y no dominante

Uno de los déficits de control neuromuscular que se observa frecuentemente de forma mayor en las deportistas femeninas es el desequilibrio entre las extremidades inferiores (pierna dominante-no dominante) a nivel de fuerza, coordinación y control postural⁶⁹. Además, es importante tener en cuenta que estas diferencias pueden ser aún más determinantes en deportistas que han sufrido una lesión, facilitando, por ejemplo, la recidiva del LCA⁷⁰ o del ligamento lateral externo del tobillo⁷¹.

En línea con esto comentado, y a pesar de que el estudio de Wikstrom et al.⁶⁵ no registró diferencias significativas entre pierna dominante y no dominante en diferentes tests de control postural dinámico (salto vertical, salto unipodal y mantenimiento del equilibrio durante 3 s) en 40 individuos sanos de ambos sexos, son varias las referencias que remarcan tales diferencias. Entre los trabajos que destacan las diferencias entre pierna dominante y no dominante figuran los de Hewett et al.^{1,72}, quienes observaron que la pierna no dominante suele tener una musculatura más débil y con menos coordinación que la dominante, especialmente en el sexo femenino y en las tareas de recepción, pivotaje y desaceleración en el salto unipodal. En esta línea, Ross et al.⁶⁴ estudiaron las diferencias de fuerza, equilibrio y rango de movimiento de la flexión de rodilla entre pierna dominante y no dominante durante la recepción unipodal en 30 individuos de ambos sexos físicamente activos. A pesar de no encontrar diferencias significativas en el tiempo de estabilización de la recepción del salto entre ambas piernas, los autores concluyeron que la absorción de las fuerzas de reacción del suelo, el equilibrio y la fuerza muscular fueron superiores en la pierna dominante. Otro de los trabajos que muestran esta tendencia resulta de una comparación de pierna dominante-no dominante en un grupo de 20 hombres y mujeres físicamente activos⁷³. Pese a no encontrar diferencias significativas en las pruebas de equilibrio unipodal con ojos abiertos y cerrados y en la recepción del salto unipodal, sí se mostraron tales diferencias cuando se

comparó por separado el grupo de mujeres, mostrándose un menor control del centro de presiones en la recepción del salto en la pierna no dominante respecto a la dominante.

Estos hechos nos llevan a poder pensar que las acciones de recepción del salto y equilibrio monopodal realizadas con la extremidad no dominante pueden facilitar la existencia de un mayor número de lesiones.

Inadecuada *stiffness* muscular

El concepto de *stiffness*, entendida como la capacidad biomecánica del músculo de oponerse al estiramiento y contraria a la complianza⁷⁴, juega un rol muy importante en la capacidad de generar fuerza explosiva. Son varios los estudios que muestran que los hombres tienen una mejor *stiffness* muscular en comparación con las mujeres en las actividades en que predominan los cambios de dirección y las perturbaciones del equilibrio⁷⁵⁻⁷⁸.

Esta propiedad, cuando la relacionamos únicamente con la activación de la musculatura periarticular, es un importante componente para la estabilidad de la articulación^{77,79}. Este concepto, al que nos podemos referir como *stiffness* activa y que es proporcional a la activación mioeléctrica y a la fuerza generada por el músculo⁷⁵, es importante diferenciarlo de la *stiffness* muscular pasiva, la cual viene dada por la capacidad elástica del conjunto muscular. Dado su componente estabilizador en la articulación, la menor *stiffness* muscular de las mujeres podría aumentar el riesgo de lesión, especialmente cuando añadimos la mayor laxitud articular del género femenino, factor que también suele relacionarse con un mayor riesgo lesivo^{80,81}.

A pesar de que esta menor *stiffness* existente en las deportistas es un factor de riesgo de lesión, existen autores que explican que el reclutamiento neuromotor puede ser utilizado para contrarrestar dicha limitación durante las actividades deportivas, mejorando de esta manera la estabilidad articular⁷⁶.

Déficits del control de la estabilidad postural

El déficit en el control de la posición del centro de gravedad ha sido descrito como un importante factor de riesgo de lesión de la extremidad inferior. Este hecho se explica si consideramos que el aumento de fluctuación de dicho centro se asocia con una falta de capacidad de estabilización corporal, lo que se relaciona con una alteración en la estrategia de control neuromuscular.

A pesar de que existen algunos trabajos que no relacionan la disminución del control postural con un mayor número de lesiones traumáticas^{82,83}, es mayor en número la bibliografía que sí relaciona estos 2 acontecimientos, especialmente en el caso del esguince de tobillo⁸⁴. De esta manera, y teniendo en cuenta que la falta de estabilidad aumenta las fuerzas que se transmiten a las estructuras articulares y musculares⁸⁵⁻⁸⁸, se ha visto una relación significativa entre la existencia de lesiones previas y la disminución de la estabilidad postural^{70,89-93}. Paterno et al.⁷⁰ estudiaron la relación entre déficits en el sistema neuromuscular y el riesgo de sufrir una segunda lesión del LCA en 53 jóvenes deportistas. Pasado un año de la lesión, 13 de los jóvenes estudiados volvieron a romperse el mismo LCA. Los autores relacionan esta

recidiva de la lesión con una menor estabilidad postural de la pierna afectada y un menor control de las articulaciones de la rodilla y la cadera durante un *drop jump*.

A estos datos también se suman diferentes trabajos que han registrado una relación entre una estabilidad postural disminuida y un mayor riesgo de sufrir lesiones deportivas^{92,94,95}. De igual manera, Plisky et al.⁹⁵ estudiaron la relación entre los resultados obtenidos mediante un test de equilibrio unipodal dinámico (*Star Excursion Balance Test* [SEBT]) y la incidencia lesiva de la extremidad inferior en 235 jugadores jóvenes de baloncesto. Los resultados indicaron que los jugadores que tenían una diferencia superior a 4 cm entre piernas en la distancia alcanzada de forma anterior tenían 2,5 veces un mayor riesgo de sufrir una lesión de la extremidad inferior.

Es importante destacar que los test utilizados para valorar el equilibrio entre los diferentes trabajos, ya sea de manera estática o dinámica, son muy variables, hecho que podría explicar los diferentes resultados obtenidos entre estudios.

Alteración de la sensibilidad propioceptiva

Aun teniendo presente que una alteración propioceptiva se puede mostrar de multitud de maneras en una articulación como la rodilla, el ejemplo más comúnmente desarrollado es el de explicar el déficit propioceptivo del LCA ante su puesta en tensión¹¹, haciendo que la musculatura isquiosural no actúe para proteger de manera correcta la rodilla y más concretamente dicho ligamento.

Teniendo en cuenta la idea comentada en el párrafo anterior, Hewett et al.⁵ estudiaron las diferencias de género en el control de la estabilidad unipodal en sujetos sanos, llegando a la conclusión de una mayor capacidad de estabilización en las mujeres en comparación con los hombres estudiados. Por el contrario, cuando estos autores estudiaban a deportistas con un déficit del LCA, los hombres tenían mayor estabilidad en comparación con las mujeres en los tests preoperatorios realizados. Una vez realizada la reparación quirúrgica del ligamento, los hombres seguían teniendo mayor estabilidad a los 6, 9 y 12 meses. Los autores sugieren que este hecho se puede asociar con una disminución más acentuada en el sexo femenino de la sensibilidad propioceptiva del LCA lesionado.

En otro estudio, Rozzi et al.⁴³ valoraron la laxitud articular, la propiocepción, el equilibrio y el tiempo necesario para conseguir la tensión máxima muscular en 34 hombres y mujeres deportistas, así como su patrón de activación muscular en diferentes pruebas realizadas. Los resultados mostraron que, en comparación con los hombres, las mujeres deportistas tenían mayor laxitud articular y necesitaban más tiempo para detectar cambios en la posición articular (peor propiocepción), a pesar de tener mayor capacidad para mantener el apoyo monopodal, lo que denota mejor equilibrio. Es evidente que la mayor capacidad para mantener una posición no es sinónimo de poder actuar rápidamente ante una pérdida de equilibrio, y es importante tener en cuenta que, especialmente en deportes de situación, las pérdidas de equilibrio son constantes.

También es interesante destacar el grupo de Roberts et al.^{14,96}, el cual observó que las rodillas post-intervención del LCA tenían un mayor umbral de detección del

movimiento pasivo de extensión de la rodilla (prueba utilizada para valorar la propiocepción) en comparación con las rodillas no operadas. Este hecho, que denota un retardo en la capacidad de notar tensión en el ligamento, está relacionado con un mayor riesgo de recidiva¹⁷.

Disminución de los mecanismos de anticipación (*feedforward*)

A todos los conceptos a los que nos hemos ido refiriendo y que están relacionados, de una forma genérica, con el control neuromuscular, hemos de añadir 2 nuevos mecanismos que influyen en el control dinámico de la articulación, y que en lengua anglosajona son conocidos como *feedback* (vía refleja) y *feedforward* (anticipación, preactivación)^{3,13,15,97,98}.

En relación con el llamado *feedback*, hemos de tener en cuenta que se trata de un estímulo sensorial al que, frecuentemente de manera refleja, responde la musculatura. Pero en acciones deportivas de máxima velocidad, especialmente en las propias de los deportes de situación que se van sucediendo de manera continua y con una marcada variabilidad, tal mecanismo tiene una limitada eficacia en su intención de proteger el organismo de sufrir una lesión. Además de su relativa lentitud para poder evitar el efecto de un mecanismo lesivo, el *feedback* puede verse afectado de manera importante por la instauración de fatiga, aumentando el retraso electromecánico de la musculatura esquelética y llevando a una disminución de la protección articular que esta desarrolla. Por otra parte, el mecanismo de *feedback* sí es adecuado para el mantenimiento de la postura y acciones desarrolladas más lentamente.

Por otra parte, el mecanismo de control *feedforward* es descrito como la capacidad de anticipación de un sujeto sin que se produzca el registro sensorial que provoca una respuesta refleja (*feedback*), sino que se basa en la identificación de una situación que el sujeto relaciona con experiencias anteriores. De esta manera, la preactivación muscular que se consigue tiene la capacidad de proteger las estructuras del aparato locomotor de una carga lesiva. Esta preparación del sistema musculoesquelético llegará a producirse gracias a la experiencia comentada de situaciones deportivas vividas, y facilitará el continuo aprendizaje de las mismas y que son previas (con un espacio de tiempo mínimo) a la presentación de cargas lesivas.

Actualmente existen varias publicaciones que indican la importancia de los movimientos de anticipación a la hora de minimizar las perturbaciones y el mantenimiento de una correcta postura. Besier et al.^{97,98} observaron cómo se duplicaron los momentos de valgo/varo y rotación interna/externa aplicados sobre la rodilla durante los cambios de dirección inesperados en comparación con las situaciones pre-planeadas. Estos autores explican que la ejecución de cambios de dirección sin una adecuada planificación puede aumentar el riesgo de lesión del LCA, probablemente como consecuencia del menor tiempo para establecer las estrategias de control neuromuscular más adecuadas en su intención de proteger la articulación. En consecuencia, estos mismos investigadores sugieren la necesidad de incluir tareas en las que se contemplen cambios de dirección inesperados en los entrenamientos. En la misma

línea, McLean et al.⁹⁹ observaron que durante los cambios de dirección en los que se incluyó a un oponente defensivo aumentaron los momentos de fuerza aplicados sobre la rodilla en ambos sexos. Este último trabajo nos ha de hacer reflexionar sobre la necesidad de incluir tareas con estímulos inesperados y de oposición en la programación del entrenamiento de los llamados deportes de situación.

Conclusiones y aplicaciones prácticas

La bibliografía científica actual describe diferentes factores de riesgo de lesión relacionados con el control del sistema neuromuscular. Entre estos destacan la fatiga muscular, la alteración de la magnitud y de los tiempos de activación muscular, la alteración de la capacidad de coactivación muscular, la estrategia de control de la extremidad inferior predominante en el plano frontal, los desequilibrios neuromusculares entre pierna dominante y no dominante, la inadecuada *stiffness* muscular, los déficits en el control postural, la disminución de la propiocepción, los déficits de *core* y la disminución en los mecanismos de anticipación.

El análisis de estos factores de riesgo proporciona una guía práctica a la hora de diseñar tareas dentro de un plan de prevención adecuado a cada tipo de especialidad deportiva, y será útil tanto para entrenadores y preparadores físicos como para fisioterapeutas.

Actualmente sabemos que los factores de riesgo neuromuscular son modificables mediante el entrenamiento. Pese a que los métodos óptimos de entrenamiento para cada grupo de población aún no han sido establecidos, existen evidencias sobre el éxito de este tipo de intervenciones en la prevención, el tratamiento y la vuelta a la competición deportiva de ciertos tipos de lesiones de la extremidad inferior. Como premisa para progresar en la dificultad y en la intensidad de los ejercicios que incluyen este tipo de entrenamiento deberíamos poner énfasis en la correcta biomecánica de la extremidad inferior, evitando o disminuyendo de esta forma las altas cargas a las que se ven sometidas las articulaciones durante las diferentes actividades deportivas. Para poder conseguir este objetivo es muy importante tener la capacidad de diseñar tareas adecuadas en cada caso, analizando su ejecución con los deportistas y dando las indicaciones adecuadas en cada momento. Podemos considerar esta premisa como la base para poder conseguir adaptaciones positivas con la intención de mejorar el control neuromuscular.

Por último, destacar la importancia de la valoración mediante instrumentos válidos y fiables con el objetivo de identificar los diferentes factores de riesgo neuromuscular citados en esta revisión.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Hewett TE, Paterno MV, Myer GD. Strategies for enhancing proprioception and neuromuscular control of the knee. Clin Orthop Relat Res. 2002;402:76-94.

2. Lephart SM, Fu FH. Proprioception and Neuromuscular Control in Joint Stability. Champaign, IL: Human Kinetics; 2000.
3. Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system. Part I. The physiologic basis of functional joint stability. *J Athl Train*. 2002;37:71-9.
4. Eils E, Rosenbaum D. A multi-station proprioceptive exercise program in patients with ankle instability. *Med Sci Sports Exerc*. 2001;33:1991-8.
5. Hewett TE, Lindenfeld TN, Riccobene JV, Noyes FR. The effect of neuromuscular training on the incidence of knee injury in female athletes. A prospective study. *Am J Sports Med*. 1999;27:699-706.
6. Lloyd DG. Rationale for training programs to reduce anterior cruciate ligament injuries in Australian football. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2001;31:645-54.
7. Panics G, Tallay A, Pavlik A, Berkes I. Effect of proprioception training on knee joint position sense in female team handball players. *Br J Sports Med*. 2008;42:472-6.
8. Herman K, Barton C, Malliaras P, Morrissey D. The effectiveness of neuromuscular warm-up strategies, that require no additional equipment, for preventing lower limb injuries during sports participation a systematic review. *BMC Med*. 2012;10:75.
9. Hewett TE, Ford KR, Myer GD. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes. Part 2. A meta-analysis of neuromuscular interventions aimed at injury prevention. *Am J Sports Med*. 2006;34:490-8.
10. Hübster M, Zech A, Pfeifer K, Hänsel F, Vogt L, Banzer W. Neuromuscular training for sports injury prevention. A systematic review. *Med Sci Sports Exerc*. 2010;42:413-21.
11. Solomonow M, Krogsgaard M. Sensorimotor control of knee stability. A review. *Scand J Med Sci Sports*. 2001;11:64-80.
12. Fort Vanmeerhaeghe A, Romero Rodriguez D. Rol del sistema sensoriomotor en la estabilidad articular durante las actividades deportivas. *Apunts Med Esport*. 2013, en prensa.
13. Riemann BL, Lephart SM. The sensorimotor system. Part II. The role of proprioception in motor control and functional joint stability. *J Athl Train*. 2002;37:80-4.
14. Roberts D. Sensory Aspects of Knee Injuries. Sweden: Lund University; 2003.
15. Fort Vanmeerhaeghe A. Valoració i entrenament del control neuromuscular per a la millora del rendiment esportiu. Barcelona: FPCEE. Blanquerna. Universitat Ramon Llull; 2010.
16. Bahr R, Holme I. Risk factors for sports injuries—a methodological approach. *Br J Sports Med*. 2003;37:384-92.
17. Bahr R, Krosshaug T. Understanding injury mechanisms a key component of preventing injuries in sport. *Br J Sports Med*. 2005;39:324-9.
18. Adirim TA, Cheng TL. Overview of injuries in the young athlete. *Sports Med*. 2003;33:75-81.
19. Myklebust G, Bahr R. Return to play guidelines after anterior cruciate ligament surgery. *Br J Sports Med*. 2005;39:127-31.
20. Griffin LY, Albohm MJ, Arendt EA, Bahr R, Beynon BD, Demaio M, et al. Understanding and preventing noncontact anterior cruciate ligament injuries a review of the Hunt Valley II meeting, January 2005. *Am J Sports Med*. 2006;34:1512-32.
21. Alentorn-Geli E, Myer GD, Silvers HJ, Samitier G, Romero D, Lazaro-Haro C, et al. Prevention of non-contact anterior cruciate ligament injuries in soccer players. Part 1. Mechanisms of injury and underlying risk factors. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc*. 2009;17:705-29.
22. Erickson H, Gribble PA. Sex differences, hormone fluctuations, ankle stability, and dynamic postural control. *J Athl Train*. 2012;47:143-8.
23. Dugan SA. Sports-related knee injuries in female athletes what gives? *Am J Phys Med Rehabil*. 2005;84:122-30.
24. Fagan V, Delahunt E. Patellofemoral pain syndrome a review on the associated neuromuscular deficits and current treatment options. *Br J Sports Med*. 2008;42:489-95.
25. Hewett TE, Myer GD, Ford KR. Anterior cruciate ligament injuries in female athletes. Part 1. Mechanisms and risk factors. *Am J Sports Med*. 2006;34:299-311.
26. Myklebust G, Engebretsen L, Braekken IH, Skjølberg A, Olsen OE, Bahr R. Prevention of anterior cruciate ligament injuries in female team handball players. A prospective intervention study over three seasons. *Clin J Sport Med*. 2003;13:71-8.
27. Hosea TM, Carey CC, Harrer MF. The gender issue epidemiology of ankle injuries in athletes who participate in basketball. *Clin Orthop Relat Res*. 2000;372:45-9.
28. Myer GD, Chu DA, Brent JL, Hewett TE. Trunk and hip control neuromuscular training for the prevention of knee joint injury. *Clin Sports Med*. 2008;27:425-48.
29. Hewett TE, Ford KR, Hoogenboom BJ, Myer GD. Understanding and preventing ACL injuries current biomechanical and epidemiologic considerations — Update 2010. *N Am J Sports Phys Ther*. 2010;5:234-51.
30. Enoka RM, Duchateau J. Muscle fatigue what, why and how it influences muscle function. *J Physiol*. 2008;586:11-23.
31. Borotikar BS, Newcomer R, Koppes R, McLean SG. Combined effects of fatigue and decision making on female lower limb landing postures central and peripheral contributions to ACL injury risk. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2008;23:81-92.
32. Chappell JD, Herman DC, Knight BS, Kirkendall DT, Garrett WE, Yu B. Effect of fatigue on knee kinetics and kinematics in stop-jump tasks. *Am J Sports Med*. 2005;33:1022-9.
33. Kernozek TW, Torry MR, Iwasaki M. Gender differences in lower extremity landing mechanics caused by neuromuscular fatigue. *Am J Sports Med*. 2008;36:554-65.
34. McLean SG, Fellin RE, Suedekum N, Calabrese G, Passerallo A, Joy S. Impact of fatigue on gender-based high-risk landing strategies. *Med Sci Sports Exerc*. 2007;39:502-14.
35. Brazen DM, Todd MK, Ambegaonkar JP, Wunderlich R, Peterson C. The effect of fatigue on landing biomechanics in single-leg drop landings. *Clin J Sport Med*. 2010;20:286-92.
36. Ortiz A, Olson S, Trudelle-Jackson E, Rosario M, Venegas HL. Landing mechanics during side hopping and crossover hopping maneuvers in noninjured women and women with anterior cruciate ligament reconstruction. *PM & R*. 2011;3:13-20.
37. Small K, McNaughton LR, Greig M, Lohkamp M, Lovell R. Soccer fatigue, sprinting and hamstring injury risk. *Int J Sports Med*. 2009;30:573-8.
38. Forestier N, Teasdale N, Nougier V. Alteration of the position sense at the ankle induced by muscular fatigue in humans. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:117-22.
39. Mohammadi F, Roozdar A. Effects of fatigue due to contraction of evertor muscles on the ankle joint position sense in male soccer players. *Am J Sports Med*. 2010;38:824-8.
40. Menacho MO, Pereira HM, Oliveira BI, Chagas LM, Toyohara MT, Cardoso JR. The peroneus reaction time during sudden inversion test systematic review. *J Electromyogr Kinesiol*. 2010;20:559-65.
41. Munn J, Sullivan SJ, Schneiders AG. Evidence of sensorimotor deficits in functional ankle instability. A systematic review with meta-analysis. *J Sci Med Sport*. 2010;13:2-12.
42. Myer GD, Ford KR, Hewett TE. The effects of gender on quadriceps muscle activation strategies during a maneuver that mimics a high ACL injury risk position. *J Electromyogr Kinesiol*. 2005;15:181-9.
43. Rozzi SL, Lephart SM, Gear WS, Fu FH. Knee joint laxity and neuromuscular characteristics of male and female soccer and basketball players. *Am J Sports Med*. 1999;27:312-9.
44. Neptune RR, Wright IC, van den Bogert AJ. The influence of orthotic devices and vastus medialis strength and timing on

- patellofemoral loads during running. *Clin Biomech* (Bristol, Avon). 2000;15:611–8.
45. Cowan SM, Bennell KL, Hodges PW, Crossley KM, McConnell J. Delayed onset of electromyographic activity of vastus medialis obliquus relative to vastus lateralis in subjects with patellofemoral pain syndrome. *Arch Phys Med Rehabil*. 2001;82:183–9.
46. Cowan SM, Bennell KL, Crossley KM, Hodges PW, McConnell J. Physical therapy alters recruitment of the vasti in patellofemoral pain syndrome. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:1879–85.
47. Hanson AM, Padua DA, Troy BJ, Prentice WE, Hirth CJ. Muscle activation during side-step cutting maneuvers in male and female soccer athletes. *J Athl Train*. 2008;43:133–43.
48. Zazulak BT, Ponce PL, Straub SJ, Medvecky MJ, Avedisian L, Hewett TE. Gender comparison of hip muscle activity during single-leg landing. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2005;35:292–9.
49. Prins MR, van der Wurff P. Females with patellofemoral pain syndrome have weak hip muscles a systematic review. *Aust J Physiother*. 2009;55:9–15.
50. Lephart SM, Ferris CM, Riemann BL, Myers JB, Fu FH. Gender differences in strength and lower extremity kinematics during landing. *Clin Orthop Relat Res*. 2002;401:162–9.
51. Fredericson M, Cookingham CL, Chaudhari AM, Dowdell BC, Oestreicher N, Sahrmann SA. Hip abductor weakness in distance runners with iliotibial band syndrome. *Clin J Sport Med*. 2000;10:169–75.
52. Imwalle LE, Myer GD, Ford KR, Hewett TE. Relationship between hip and knee kinematics in athletic women during cutting maneuvers. A possible link to noncontact anterior cruciate ligament injury and prevention. *J Strength Cond Res*. 2009;23:2223–30.
53. Jacobs CA, Uhl TL, Mattacola CG, Shapiro R, Rayens WS. Hip abductor function and lower extremity landing kinematics sex differences. *J Athl Train*. 2007;42:76–83.
54. Leetun DT, Ireland ML, Willson JD, Ballantyne BT, Davis IM. Core stability measures as risk factors for lower extremity injury in athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2004;36:926–34.
55. Borghuis J, Hof AL, Lemmink KA. The importance of sensory-motor control in providing core stability implications for measurement and training. *Sports Med*. 2008;38:893–916.
56. Kibler WB, Press J, Sciascia A. The role of core stability in athletic function. *Sports Med*. 2006;36:189–98.
57. Zazulak BT, Hewett TE, Reeves NP, Goldberg B, Cholewicki J. Deficits in neuromuscular control of the trunk predict knee injury risk. A prospective biomechanical-epidemiologic study. *Am J Sports Med*. 2007;35:1123–30.
58. Akuthota V, Nadler SF. Core strengthening. *Arch Phys Med Rehabil*. 2004;85 Suppl 1:S86–92.
59. Hewett TE, Myer GD, Ford KR, Heidt Jr RS, Colosimo AJ, McLean SG, et al. Biomechanical measures of neuromuscular control and valgus loading of the knee predict anterior cruciate ligament injury risk in female athletes a prospective study. *Am J Sports Med*. 2005;33:492–501.
60. Ford KR, van den Bogert J, Myer GD, Shapiro R, Hewett TE. The effects of age and skill level on knee musculature co-contraction during functional activities a systematic review. *Br J Sports Med*. 2008;42:561–6.
61. Hewett TE, Zazulak BT, Myer GD, Ford KR. A review of electromyographic activation levels, timing differences, and increased anterior cruciate ligament injury incidence in female athletes. *Br J Sports Med*. 2005;39:347–50.
62. Lloyd DG, Buchanan TS, Besier TF. Neuromuscular biomechanical modeling to understand knee ligament loading. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37:1939–47.
63. McLean SG, Walker KB, van den Bogert AJ. Effect of gender on lower extremity kinematics during rapid direction changes an integrated analysis of three sports movements. *J Sci Med Sport*. 2005;8:411–22.
64. Ross S, Guskiewicz K, Schneider PW, Yu RB. Comparison of biomechanical factors between the kicking and stance limbs. *J Sport Rehabil*. 2004;13:135–50.
65. Wikstrom EA, Tillman MD, Kline KJ, Borsa PA. Gender and limb differences in dynamic postural stability during landing. *Clin J Sport Med*. 2006;16:311–5.
66. Nyland J, Smith S, Beickman K, Armsey T, Caborn DN. Frontal plane knee angle affects dynamic postural control strategy during unilateral stance. *Med Sci Sports Exerc*. 2002;34:1150–7.
67. Ford KR, Myer GD, Toms HE, Hewett TE. Gender differences in the kinematics of unanticipated cutting in young athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 2005;37:124–9.
68. Ireland ML, Willson JD, Ballantyne BT, Davis IM. Hip strength in females with and without patellofemoral pain. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2003;33:671–6.
69. Myer GD, Brent JL, Ford KR, Hewett TE. Real-time assessment and neuromuscular training feedback techniques to prevent ACL injury in female athletes. *Strength Cond J*. 2011;33:21–35.
70. Paterno MV, Schmitt LC, Ford KR, Rauh MJ, Myer GD, Huang B, et al. Biomechanical measures during landing and postural stability predict second anterior cruciate ligament injury after anterior cruciate ligament reconstruction and return to sport. *Am J Sports Med*. 2010;38:1968–78.
71. Ross SE, Guskiewicz KM. Examination of static and dynamic postural stability in individuals with functionally stable and unstable ankles. *Clin J Sport Med*. 2004;14:332–8.
72. Hewett TE, Stroupe AL, Nance TA, Noyes FR. Plyometric training in female athletes. Decreased impact forces and increased hamstring torques. *Am J Sports Med*. 1996;24:765–73.
73. Fort A, Romero D, Costa L, Bagur C, Lloret M, Montañaola A. Diferències de l'estabilitat postural estàtica i dinàmica segons gènere i cama dominant. *Apunts Med Esport*. 2009;44:74–81.
74. Enoka RM. *Neuromechanical Basis of Kinesiology*. Champaign, IL: Human Kinetics; 1994.
75. Granata KP, Wilson SE, Padua DA. Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part I. Quantification in controlled measurements of knee joint dynamics. *J Electromyogr Kinesiol*. 2002;12:119–26.
76. Granata KP, Padua DA, Wilson SE. Gender differences in active musculoskeletal stiffness. Part II. Quantification of leg stiffness during functional hopping tasks. *J Electromyogr Kinesiol*. 2002;12:127–35.
77. Wojtys EM, Ashton-Miller JA, Huston LJ. A gender-related difference in the contribution of the knee musculature to sagittal-plane shear stiffness in subjects with similar knee laxity. *J Bone Joint Surg Am*. 2002;84-A:10–6.
78. Wojtys EM, Huston LJ, Schock HJ, Boylan JP, Ashton-Miller JA. Gender differences in muscular protection of the knee in torsion in size-matched athletes. *J Bone Joint Surg Am*. 2003;85-A:782–9.
79. Padua DA, Carcia CR, Arnold BL, Granata KP. Gender differences in leg stiffness and stiffness recruitment strategy during two-legged hopping. *J Mot Behav*. 2005;37:111–25.
80. Decoster LC, Bernier JN, Lindsay RH, Vilas JC. Generalized joint hypermobility and its relationship to injury patterns among NCAA lacrosse players. *J Athl Train*. 1999;34:99–105.
81. Karageanes SJ, Blackburn K, Vangelos ZA. The association of the menstrual cycle with the laxity of the anterior cruciate ligament in adolescent female athletes. *Clin J Sport Med*. 2000;10:162–8.
82. Bernier JN, Perrin DH, Rijke A. Effect of unilateral functional instability of the ankle on postural sway and inversion and eversion strength. *J Athl Train*. 1997;32:226–32.
83. Isakov E, Mizrahi J. Is balance impaired by recurrent sprained ankle? *Br J Sports Med*. 1997;31:65–7.
84. McKeon PO, Hertel J. Systematic review of postural control and lateral ankle instability. Part I. Can deficits be detected with instrumented testing. *J Athl Train*. 2008;43:293–304.

85. Ageberg E. Postural control in single-limb stance. In individuals with anterior cruciate ligament injury and uninjured controls. Department of Physical Therapy, Lund University; 2003.
86. Friden T, Zatterstrom R, Lindstrand A, Moritz U. A stabilometric technique for evaluation of lower limb instabilities. *Am J Sports Med.* 1989;17:118–22.
87. Matsusaka N, Yokoyama S, Tsurusaki T, Inokuchi S, Okita M. Effect of ankle disk training combined with tactile stimulation to the leg and foot on functional instability of the ankle. *Am J Sports Med.* 2001;29:25–30.
88. Tropp H, Odenrick P. Postural control in single-limb stance. *J Orthop Res.* 1988;6:833–9.
89. Freeman MA, Dean MR, Hanham IW. The etiology and prevention of functional instability of the foot. *J Bone Joint Surg Br.* 1965;47:678–85.
90. Lysholm M, Ledin T, Odkvist LM, Good L. Postural control—a comparison between patients with chronic anterior cruciate ligament insufficiency and healthy individuals. *Scand J Med Sci Sports.* 1998;8:432–8.
91. Tropp H, Ekstrand J, Gillquist J. Stabilometry in functional instability of the ankle and its value in predicting injury. *Med Sci Sports Exerc.* 1984;16:64–6.
92. Tropp H, Ekstrand J, Gillquist J. Factors affecting stabilometry recordings of single limb stance. *Am J Sports Med.* 1984;12:185–8.
93. Olmsted LC, Carcia CR, Hertel J, Shultz SJ. Efficacy of the Star Excursion Balance Tests in detecting reach deficits in subjects with chronic ankle instability. *J Athl Train.* 2002;37:501–6.
94. McGuine TA, Greene JJ, Best T, Levenson G. Balance as a predictor of ankle injuries in high school basketball players. *Clin J Sport Med.* 2000;10:239–44.
95. Plisky PJ, Rauh MJ, Kaminski TW, Underwood FB. Star Excursion Balance Test as a predictor of lower extremity injury in high school basketball players. *J Orthop Sports Phys Ther.* 2006;36:911–9.
96. Roberts D, Ageberg E, Andersson G, Friden T. Clinical measurements of proprioception, muscle strength and laxity in relation to function in the ACL-injured knee. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc.* 2007;15:9–316.
97. Besier TF, Lloyd DG, Ackland TR, Cochrane JL. Anticipatory effects on knee joint loading during running and cutting maneuvers. *Med Sci Sports Exerc.* 2001;33:1176–81.
98. Besier TF, Lloyd DG, Ackland TR. Muscle activation strategies at the knee during running and cutting maneuvers. *Med Sci Sports Exerc.* 2003;35:119–27.
99. McLean SG, Lipfert SW, van den Bogert AJ. Effect of gender and defensive opponent on the biomechanics of sidestep cutting. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36:1008–16.