

Trabajo Fin de Grado. Grado en Fisioterapia

**“EFECTOS DE LA FATIGA SOBRE LA BIOMECÁNICA
DE MIEMBRO INFERIOR EN ATLETAS. UNA
REVISIÓN SISTEMÁTICA.”**

“EFFECTS OF FATIGUE ON LOWER EXTREMITY BIOMECHANICS IN ATHLETES.
A SYSTEMATIC REVIEW”

“EFECTOS DA FATIGA SOBRE A BIOMECÁNICA DO MEMBRO INFERIOR. UNHA
REVISIÓN SISTEMÁTICA”

Natalia López Ferreño

DNI 44493741-B

Tutora: Verónica Robles García

Convocatoria Junio 2015



RESUMEN:

El propósito de la presente revisión sistemática es examinar y describir los cambios biomecánicos que se producen en el miembro inferior como consecuencia de la aparición de fatiga, durante o tras la actividad deportiva, en atletas. Se realiza una búsqueda en 3 bases de datos y se clasifican 16 artículos incluidos según el grado de evidencia propuesto por el *North of England Evidence Based Guideline Development Project*.

Entre los estudios experimentales revisados existen diferencias metodológicas importantes. A pesar de ello, con los resultados obtenidos, se puede concluir que la fatiga induce una disminución de las fuerzas de reacción del suelo (GRF) y de los ángulos de flexión de cadera y rodilla, así como un aumento del valgo y la rotación interna de rodilla en las tareas de aterrizaje. La literatura científica coincide en que esto provoca un aumento del riesgo de sufrir lesiones, especialmente las relacionadas con el ligamento cruzado anterior.

En definitiva, la aparición de fatiga influye en la producción de lesiones. Con esto se evidencia la necesidad de incluir estrategias basadas en el conocimiento de los factores que provocan la aparición de fatiga dentro del diseño de los planes de prevención. En este sentido, los artículos concluyen que el entrenamiento de la fuerza muscular excéntrica permite no solo aumentar el rendimiento sino también retrasar la aparición de fatiga, lo que permite en última instancia reducir el riesgo de producción de lesiones.

PALABRAS CLAVE (MESH): *fatigue, muscle fatigue, lower extremity, athletes, prevention and control, sports*

TABLA DE CONTENIDOS

Introducción	1
Objetivo principal y objetivos secundarios	3
Hipótesis	3
Material y Métodos	4
Resultados	11
Discusión	28
Conclusiones	35
Referencias bibliográficas	37
Apéndices	40

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realiza una revisión sistemática cualitativa acerca de los efectos que la fatiga ocasiona en el miembro inferior en atletas. En la actualidad, se han identificado factores de riesgo modificables y no modificables causantes de la aparición de lesiones. El conocimiento de los factores de riesgo modificables permite que, con una actuación adecuada, se minimicen las posibilidades de sufrir una lesión al poder actuar sobre ellos. Por tanto, para poder prevenir la aparición de lesiones relacionadas con la fatiga, es necesario comprender previamente los cambios biomecánicos que se producen durante la misma. En mi opinión, la fatiga es un elemento a tener en cuenta en la mayoría de los ámbitos de la fisioterapia, y en especial en la fisioterapia deportiva, ya que los atletas están expuestos a estas condiciones no solo durante los periodos de competición sino también durante los entrenamientos. Mi motivación personal es conocer en profundidad el comportamiento biomecánico del miembro inferior tras la aparición de fatiga para saber cómo se puede influir en la prevención de lesiones.

La fatiga se define como una disminución de la capacidad de un músculo para mantener una fuerza de contracción constante ante una estimulación repetitiva a largo plazo. La fatiga neuromuscular es inducida por el ejercicio de alta intensidad; en estas condiciones, las unidades motoras se estimulan para que los músculos se contraigan con una mayor frecuencia. Estos impulsos repetidos provocan que se produzca un agotamiento de la acetilcolina en las terminaciones sinápticas, provocando un fallo en la transmisión muscular. Estos mecanismos afectan tanto a la capacidad muscular de generar fuerza como a la capacidad del sistema nervioso para desencadenar contracciones musculares (1). Se puede diferenciar entre dos tipos principales de fatiga, la central y la periférica (2). La fatiga central se origina en estructuras superiores a la unión neuromuscular e implica una disminución de la contracción en reposo, puede aparecer ante contracciones sostenidas máximas, ejercicios fatigantes y estados de enfermedad en los que existe una alteración de la función de la motoneurona superior. Por otro lado, la fatiga periférica refleja cambios locales, provocados por el ejercicio progresivo, que disminuyen la fuerza máxima que es capaz de producir el músculo (3).

En general, la fatiga se produce como consecuencia de la combinación

de mecanismos fisiológicos, biomecánicos y psicológicos (4) y se relaciona con la aparición de lesiones en el miembro inferior tanto en atletas como en sujetos no entrenados (5). Comúnmente, se relaciona la aparición de fatiga en el miembro inferior con lesiones del ligamento cruzado anterior (5-11) y esguinces de tobillo (12).

Todas las actividades prolongadas ocasionan fatiga, independientemente de la condición física del sujeto; sin embargo, los atletas, por el número de horas de entrenamiento y competición, son más susceptibles a la fatiga y por tanto a la producción de lesiones. En esta línea se sugiere considerar la aparición de fatiga en los programas de prevención y rehabilitación de lesiones (7). Para ello es necesario conocer los factores que inducen fatiga y cómo éstos afectan al miembro inferior desde un punto de vista cinético y cinemático.

A pesar de que el estudio de los efectos de la fatiga sobre el miembro inferior posee una gran relevancia clínica, no existen criterios unificadores a la hora de realizar estudios, incluyendo la disparidad entre los participantes (en cuanto a la edad, condición física y tipo de deporte que realizan), entre los protocolos de fatiga empleados, (algunos optan por generar fatiga local mientras otros prefieren inducir fatiga funcional¹) y entre los resultados obtenidos tras el protocolo.

Por estos motivos, existe la necesidad de sintetizar los resultados de los estudios realizados hasta el momento, con el propósito de guiar las investigaciones futuras e incorporar los factores que influyen en la aparición de fatiga como elementos a tener en cuenta en los programas de prevención de lesiones. Así, el principal propósito de esta revisión sistemática es identificar los cambios biomecánicos que la fatiga ocasiona en el miembro inferior en atletas y cómo influye ésta en la producción y prevención de lesiones.

¹Fatiga producida por actividades que imitan o simulan una actividad funcional. No representa la experiencia deportiva exacta pero proporcionan información relacionada con los cambios producidos durante el entrenamiento deportivo y la competición(13)

OBJETIVO PRINCIPAL Y OBJETIVOS SECUNDARIOS

Tras la revisión se espera conocer los cambios biomecánicos que se producen en el miembro inferior como consecuencia de la aparición de fatiga durante o tras la actividad deportiva. Específicamente, esta revisión pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- Analizar cómo influye la fatiga en la biomecánica del miembro inferior realizando una comparación entre los datos cinéticos y cinemáticos en los estados de prefatiga y postfatiga.
- Relacionar la actividad y la duración de la misma con la aparición de la fatiga. Conocer el tiempo que tiene que transcurrir para que el organismo se recupere de la fatiga.
- Determinar si la aparición de fatiga se asocia con un mayor número de lesiones deportivas.
- Conocer los planes de prevención para reducir las lesiones producidas por la aparición de fatiga descritos en la literatura científica.

HIPÓTESIS

- La fatiga provoca alteraciones en la cinética y la cinemática lo que modifica las estrategias durante la fase de aterrizaje² provocando un aumento de las lesiones en el miembro inferior.
- Con la aparición de fatiga, los ángulos de flexión de cadera y rodilla disminuyen, por lo que los aterrizajes sobre una pierna se realizan en una posición “más erguida”.
- Las fuerzas de impacto y de compresión se incrementan tras la aparición de fatiga, lo que va a provocar un aumento de la prevalencia e incidencia de lesiones en atletas.

²Momento de toma contacto del pie con el suelo

MATERIAL Y MÉTODOS

1. Tipo de estudio

La revisión sistemática es un estudio pormenorizado, específico y crítico que trata de analizar e integrar la información esencial de los estudios primarios de investigación sobre un problema específico.(14)

Con las revisiones sistemáticas se intenta recopilar toda la información que se ajuste a unos criterios predefinidos con la finalidad de responder a una pregunta de investigación específica. (15)

Para minimizar posibles sesgos se emplea una metodología específica y sistemática que nos permite obtener resultados más fiables.

Podemos definir una serie de características de las revisiones sistemáticas:

- Se establecen unos objetivos específicos.
- Se sigue una metodología explícita y reproducible.
- Se realiza una búsqueda sistemática de todos los estudios que cumplan los criterios de inclusión.
- Se evalúan las conclusiones de los estudios incluidos.
- Se presentan de forma sistemática y sintética las características y resultados de los estudios incluidos.

2. Fechas de consulta:

La búsqueda se ha realizado entre los meses de Febrero y Abril de 2015.

3. Criterios de inclusión y de exclusión

Para la selección de artículos se definen unos criterios de inclusión:

- Estudios con grado de evidencia entre I y III *North of England Evidence Based Guideline Development Project (16)* en los que se reflejen los cambios biomecánicos que provoca la actividad deportiva en el miembro inferior de atletas.
- Estudios a los que se pueda tener acceso de forma gratuita a través de los recursos de la biblioteca de la Universidad de A Coruña.
- Estudios publicados en lengua española o inglesa entre los años 2005 y 2015.

Como criterios de exclusión se establecen los siguientes:

- Estudios que no se ajusten a la definición de las palabras clave.
- Estudios en un idioma diferente al castellano y al inglés.
- Estudios realizados en animales.

4. Bases de datos empleadas y palabras clave

Se lleva a cabo una búsqueda en las bases de datos MEDLINE-PubMed (National Library of Medicine, Estados Unidos), Scopus y PEDro (Apéndice II) con la combinación de las palabras clave: *fatigue*, *muscle fatigue*, *lower extremity*, *athletes*, *prevention* y *sports*.

5. Estrategia de búsqueda (Apéndice III)

5.1 PubMed

Para realizar una búsqueda en esta base de datos, podemos emplear términos en lenguaje controlado o en lenguaje libre o natural.

- Los términos en lenguaje controlado son descriptores, palabras clave o encabezamientos que emplea la base de datos para definir el contenido de los artículos, proporcionando de este modo una búsqueda eficaz. Podemos diferenciar entre:
 - MESH: tesoro propio de PubMed, Medical Subject Heading [Mesh]. Términos principales de la búsqueda.
 - SUBHEADING (subencabezamientos): palabras del tesoro que nos permiten concretar el término en uno o varios aspectos específicos, permitiendo una búsqueda más precisa.
- El lenguaje libre o natural no son más que términos empleados en la literatura científica pero que no se encuentran dentro del tesoro de Medline.

5.1.1 Conceptos clave

- **Fatiga** (*fatigue* [MeSH]): estado de debilidad tras un periodo de esfuerzo, físico o mental, que se caracteriza por una disminución de la capacidad para el trabajo y reducción de la eficiencia para responder a los estímulos.

- **Fatiga muscular** (*muscle fatigue* [MeSH]): estado que se alcanza a través de una contracción muscular prolongada y fuerte. Los estudios han demostrado que durante el ejercicio submáximo prolongado, la aparición de fatiga aumenta en proporción casi directa con la tasa de agotamiento de glucógeno muscular. En situaciones de ejercicio máximo se asocia la fatiga muscular a la falta de oxígeno y con el aumento de la concentración de lactato en sangre así como con el aumento de la concentración de iones de hidrógeno en el músculo (PubMed, 1995).
- **Extremidades inferiores** (*lower extremity* [MeSH]): región del miembro inferior en animales, se extiende desde la región glútea hasta el pie, incluyendo las nalgas, la cadera y la pierna (PubMed, 2003).
- **Atletas** (*athletes* [MeSH]): personas que han desarrollado habilidades, resistencia física y fuerza, participantes de deportes o de otras actividades físicas (PubMed, 2010).
- **Prevención** (*prevention and control* [Subheading]): empleamos este término cuando nos referimos al aumento de la resistencia humana o animal contra una enfermedad, controlando los agentes de transmisión, la prevención y control de los riesgos ambientales y de los factores sociales que conducen a la enfermedad (PubMed, 1966).
- **Deportes** (*sports* [MeSH]): actividades o juegos que, por lo general, implican un esfuerzo físico o habilidad (PubMed, 1975).

5.1.2 Límites

- Idiomas: español e inglés.
- Fechas: publicado en los últimos 10 años.

5.1.3 Caja de búsqueda

("Fatigue"[Mesh] OR "Muscle Fatigue"[Mesh]) AND "Lower Extremity"[Mesh] AND "Athletes"[Mesh]. **Resultados: 24.**

"Fatigue"[Mesh] AND "Lower Extremity"[Mesh] AND "prevention and control"[Subheading] AND "Sports"[Mesh]. **Resultados: 16.**

5.2 SCOPUS

La base de datos SCOPUS no tiene tesaurus propio, si no que utiliza el de Pubmed. Para equiparar la búsqueda con la realizada en PubMed vamos a emplear los mismos términos.

En esta base de datos se permite definir palabras clave de la búsqueda colocando KEY y las palabras elegidas entre paréntesis en la caja de búsqueda. Se establece como KEY *fatigue AND "lower extremity"* por ser el tema principal de la revisión bibliográfica.

5.2.1 Conceptos clave

Fatiga (*fatigue*), extremidades inferiores (*lower extremity*), atletas (*athletes*), prevención (*prevention*).

5.2.2 Límites

- Idiomas: español e inglés.
- Fechas: publicado en los últimos 10 años.

5.2.3 Caja de búsqueda

KEY (*fatigue AND "lower extremity"*) AND *athletes AND prevention*.

Resultados: 28.

5.3 PEDro

PEDro es una base de datos gratuita en la que podemos encontrar ensayos clínicos, revisiones sistemáticas y guías de práctica clínica de Fisioterapia Basada en la Evidencia.

Se realiza una búsqueda con las palabras clave *fatigue* y *athletes*.

Los límites de la búsqueda, al igual que en PubMed y Scopus van a ser los idiomas español e inglés y las publicaciones en los últimos 10 años.

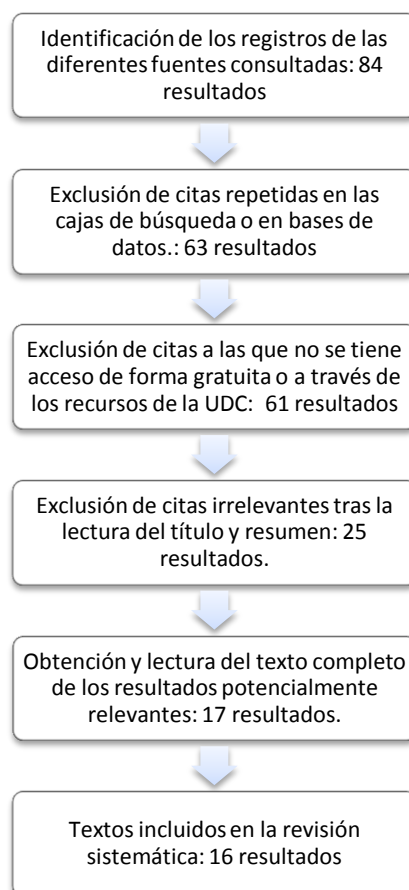
Con esta búsqueda obtenemos **16 resultados**.

6. Selección de resultados de la búsqueda

Los artículos obtenidos como resultado de las búsquedas previas se introducen en unas tablas elaboradas con el programa de Microsoft Office Excel. En la figura 1 se describe cómo se ha realizado la selección de los artículos que finalmente se incluyen en la revisión, esta figura se complementa con el **Apéndice III**.

De forma conjunta se ha realizado una revisión manual de los artículos, eliminando aquellos que: aparecen duplicados por realizar la búsqueda en tres bases de datos, no guardan relación con los objetivos de la revisión o son artículos no científicos, como por ejemplo cartas al director. Se incluyen por tanto en la revisión sistemática 16 artículos.

Figura 1: Descripción del proceso de selección de los estudios.



En las tablas elaboradas con el programa Microsoft Office Excel recogemos la información relativa al artículo: su identificación, calidad y contenido como se detalla a continuación:

- a. Identificación del artículo:
- Autor del artículo.
 - Título del artículo.
 - Base de datos en la que se ha obtenido.
 - Título de la revista en la que ha sido publicado el artículo.
 - Caja de búsqueda con la que se ha localizado el artículo en la base de datos.
 - Identificación de acceso de forma gratuita o a través de los recursos de la biblioteca de la Universidad de la Coruña.
- b. Análisis de los resultados: se describirán los resultados obtenidos según:
- Tipo de estudio y grado de evidencia: la *North of England Evidence Based Guideline Development Project* en 1996 (tabla 1) permite clasificar los artículos atendiendo al grado de evidencia (16).

Tabla 1: North of England Evidence Based Guideline Development Project, 1996

North of England Evidence Based Guideline Development Project 1996
Categorización de la evidencia
I: Ensayos clínicos controlados, meta-análisis o revisiones sistemáticas bien diseñadas.
II: Estudios controlados no aleatorizados bien diseñados (cohortes, casos y controles)
III: Estudios no controlados o consenso

- Metodología empleada: variables analizadas, protocolo de fatiga y tareas evaluadas.
- Efectos: análisis de resultados obtenidos tras el protocolo de fatiga y conclusiones.
- Influencia y relación de los resultados obtenidos con la prevención de lesiones.

c. Determinación de la calidad del artículo:

- Factor de impacto Journal Citation Reports (JCR) obtenido a través de Web of Science (WOS).
- Número de citas: número de veces que un artículo ha sido citado en otros artículos.
- Factor de impacto SCImago Journal Rank (SCR) obtenido a través de SCOPUS.

Además de incluir los artículos en la tabla, se exportan a RefWorks, un gestor bibliográfico que permite importar referencias desde las bases de datos para poder incluir citas y bibliografía en un documento.

RESULTADOS

1. Estudios incluidos

En la revisión bibliográfica se incluyen 16 artículos, los cuales se van a analizar siguiendo los puntos descritos en la metodología.

2. Análisis de los resultados

2.1 Análisis de los resultados de los artículos incluidos en la revisión bibliográfica.

2.1.1 Estudios experimentales (tabla II)

- Tipos de estudio, selección de la muestra y grado de evidencia:

Los estudios experimentales se clasifican como tales por la existencia de un factor de estudio asignado por el equipo de investigación (15); de acuerdo con el concepto general de experimentación, el investigador pretende manipular una variable para observar el resultado sobre otra variable en el futuro, se trata por tanto de estudios prospectivos o hacia el futuro. Se puede diferenciar entre dos tipos de diseños experimentales: los ensayos clínicos controlados y los no controlados (17). El diseño metodológico que escoge el autor para realizar el estudio, no siempre aparece definido en el artículo, cuando esto sucede se clasifica en función de los criterios metodológicos estándar para cada tipo de estudio.

Los ensayos clínicos controlados se emplean para establecer si una hipótesis es válida cuando existe una relación entre dos o más variables. Para ello se forman dos grupos de sujetos, con la mayor similitud posible: un grupo experimental y otro control. La validez de estos estudios aumenta con: la asignación aleatoria de cada individuo al grupo experimental o al grupo control; el cruzamiento de los grupos, de tal modo que el experimental pasa a ser control y viceversa; y con el desconocimiento por parte del sujeto del grupo al que pertenece (simple ciego) o el desconocimiento por parte del sujetos y el examinador (doble ciego). La dificultad técnica o ética para formar un grupo control hace necesario el diseño de estudios en los que no existan sujetos testigo que no reciban ninguna intervención, a estos estudios se les denomina

estudios no controlados. En estos casos se puede recurrir al diseño de estudios con controles paralelos intercurrentes, en los que tras un periodo de lavado los casos se convierten en controles y los controles en casos, de tal modo que se aplica una intervención en ambos grupos (17).

De los 16 artículos reseñados, 14 son clasificados como estudios experimentales, de los cuales tenemos 2 estudios controlados y 11 no controlados. De los dos artículos restantes, uno de ellos se clasifica como estudio descriptivo (18) mientras el otro es considerado por sus autores un estudio de diseño de medidas repetidas (9).

Dos de estos estudios experimentales incluyen dentro de sus participantes a representantes de los dos sexos. Mientras Dominguese *et al.* (11) emplean los datos de los 20 participantes para hacer una comparación entre los resultados entre sexos, Cone y sus colaboradores (8) tan solo establecen una división entre 12 hombres y 12 mujeres sin relacionar o comparar los datos entre sexos. Kernozek *et al.* (7) también diferencian en su estudio entre mujeres (n=14) y hombres (n=16) mientras que Abt *et al.* (19), centrándose en el análisis de variables en 12 corredores, no diferencian los resultados por sexos.

También se incluyen estudios experimentales en los que solo se considera un sexo como población de estudio. Entre ellos nos encontramos a los que únicamente estudian a varones: Comyns *et al.* (4) con 13 participantes, Girard *et al.* (20) con 12 participantes, Hayes *et al.* (21) con 10 participantes, y Ross *et al.* (22) con 8 participantes. Por el contrario las 90 participantes de Gerlach *et al.* (23) y las 15 de Cortes *et al.* (6) son mujeres. Quammen *et al.* (10) y Cortes *et al.* (5) clasifican sus artículos como estudios controlados de laboratorio utilizando una población de estudio de 15 y 18 participantes femeninas respectivamente. Patrek *et al.* (18) describe los cambios en la mecánica de aterrizaje de 20 mujeres.

Como se ha mencionado previamente, la revisión cuenta con dos estudios controlados, puntuados con el máximo nivel de evidencia (nivel de evidencia I) según el *North of England Evidence Based Guideline Development Project* de 1996 (16). Steib *et al.* (12) utiliza a 57 atletas, divididos en tres grupos: 19 con inestabilidad funcional de tobillo, 19 con esguince de tobillo y 19 sujetos control para poder demostrar el efecto de la fatiga en los atletas. Clark, en su estudio publicado en el 2009 también establece un grupo control de 11 individuos no

atletas para comparar el efecto del entrenamiento sobre la biomecánica articular, los otros 11 individuos del estudio eran 11 jugadores de rugby (24).

- Variables analizadas:

Uno de los objetivos propuestos en esta revisión es conocer los cambios biomecánicos que sufre el miembro inferior, tras la aparición de la fatiga en atletas. Para ello se analizan variables cinemáticas y cinéticas.

La medición de estas variables se realiza antes y después de la realización del protocolo de fatiga o antes y durante el protocolo de fatiga, para de este modo establecer una secuencia temporal que nos permita contrastar dos o más valores. De los artículos incluidos en la revisión, tan solo cuatro optan por realizar las mediciones durante la actividad fatigante, son Girard *et al.*(20), el grupo de Hayes (21), Abt *et al.* (19) y Gerlach y sus colaboradores (23).

Las variables cinemáticas están implicadas en la descripción del movimiento, independientemente de las fuerzas que lo producen, incluyen:

- Desplazamientos angulares de los segmentos corporales en los diferentes planos. De los siete estudios que analizan el movimiento articular, cuatro de ellos lo hacen en las tres dimensiones (6, 7, 9,10), dos en el plano sagital y frontal en las articulaciones de cadera y rodilla (18) y uno en el plano sagital y frontal en las articulaciones de rodilla y tobillo (19).
- Desplazamientos lineales: cambios de posición en el cuerpo humano con respecto a un sistema de referencia inicial, que puede ser fijo (estático) o relativo (en movimiento). En esta línea, Girard y sus colaboradores (20) y Comyns *et al.* (4) analizan los diferentes parámetros de la zancada (momento de impulso y aterrizaje, tiempo de contacto y aéreo, duración total de la zancada) comparándolos en condiciones de prefatiga y postfatiga.
- Velocidades y aceleraciones: Abt *et al.* (19), miden la aceleración de la cabeza y la pierna en los participantes de su estudio; por otro lado, Steib *et al.* (12) analiza la velocidad del centro de presiones antero-posterior y medio-lateral.

Las variables cinéticas son aquellas relacionadas con las causas que producen el movimiento, es decir, con las fuerzas externas o internas.

La elección de las variables depende de los objetivos que se propongan los autores al diseñar el estudio; en la **Tabla II** se resumen las variables analizadas en cada uno de los estudios incluidos en la revisión sistemática.

- Protocolo de fatiga:

Existen discrepancias entre los protocolos de fatiga entre los diferentes estudios. En el caso de Quammen *et al.* (10) y Lucci y sus colaboradores (9), emplean dos protocolos de fatiga uno de ellos denominado "*Functional Agility Short-Term Fatigue Protocol*" (FAST-FP), también empleado por Cortes *et al.* (2012) y el otro "*Slow Linear Oxidative Fatigue Protocol*" (SLO-FP) que utiliza Cortes y sus colaboradores (5) en otro estudio del año 2013. Los participantes inician el FAST-FP con 20 segundos de subida y bajada de una plataforma de 30 cm de altura, a continuación realizan un test "L-drill" (**Figura 2**), inmediatamente después se realizan 5 saltos verticales y por último los participantes corren hacia atrás en una escalera de agilidad. Esta serie se realiza cuatro veces empleando un tiempo aproximado de 5 minutos por participante. Para el SLO-FP se emplean alrededor de 45 minutos, se inicia el protocolo con un test para determinar el VO_2 máx (carrera continua a una velocidad de 9 km/h durante 5 minutos, tras los cuales se aumenta cada 2 minutos la velocidad en 1 km/h hasta el agotamiento); y a continuación se realizan seis intervalos, alternando 4 minutos de carrera al 70% de la velocidad máxima alcanzada con el test con 1 minuto de carrera al 90% de dicha velocidad.

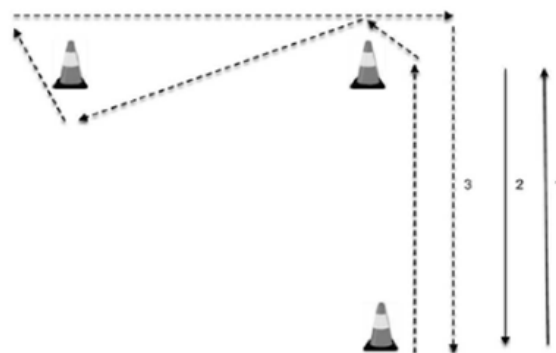


Figura 2: Esquema de un circuito "L-drill"

En siete artículos, sus autores deciden provocar la fatiga con carrera variando la distancia y/o velocidad empleada en cada uno de ellos (**Tabla II**).

Otros autores prefieren provocar la fatiga aislada de un músculo o grupo muscular con tareas específicas y no con un protocolo determinado, este es el caso de Patrek *et al.* (18), que realiza un ejercicio de abducción (ABD) de cadera de 30° alcanzando la fatiga muscular cuando no alcanza estos grados por dos ocasiones consecutivas, o Kernozek *et al.* (7) -que emplea la máquina de Smith para provocar fatiga a través de squats- y de Comyns *et al.* (4), consideran que se produce el estado de fatiga cuando el paciente no es capaz de realizar tres saltos máximos con rebote en un aparato que simula el aterrizaje sobre una pierna.

- Tareas evaluadas:

A pesar de que cuatro de los estudios no evalúan una tarea específica antes y después del protocolo de fatiga, sino que realizan las propias mediciones durante la carrera, el resto analizan diversos tipos de tareas.

Dominguese *et al.* (11), piden a los participantes saltos desde una plataforma de 60 cm aterrizando sobre las dos piernas; Patrek *et al.* (18) también registra aterrizajes desde una plataforma, sin embargo los solicita sobre una sola pierna, la dominante, y desde 40 cm. Kernozek y sus colaboradores (7) realizan una tarea similar, pero en lugar de una plataforma emplean una barra suspendida de manera que los participantes tengan los pies a 50 cm del suelo, realizando 6 caídas sobre la pierna dominante. Comyns *et al.* (4) emplean la máquina con la que generan fatiga para evaluar las tareas de aterrizaje sobre el miembro inferior.

En los dos estudios incluidos de Cortés y sus colaboradores (5,6) emplean las mismas tareas para analizar el miembro inferior de los participantes, se trata de una tarea stop-salto y de cambios de direcciones pivotando sobre la pierna dominante ambas realizadas de forma imprevista cuando se apaga una luz situada en el área donde se está realizando el estudio. Lucci *et al.* (9) también emplean el cambio de dirección inesperado sobre la pierna dominante para analizar la biomecánica de miembro inferior antes y después de realizar un protocolo de fatiga. Quammen y sus colaboradores (10) optan por solicitar tareas de stop-salto inesperadas.

Steib *et al.* (12) además de emplear actividades de aterrizaje sobre una pierna para cuantificar el tiempo de estabilización y de control postural, emplea el “*star excursion balance test*” (SEBT) (**Figura 3**) para conocer cómo varía la distancia alcanzada en las diferentes direcciones tras un protocolo de fatiga.

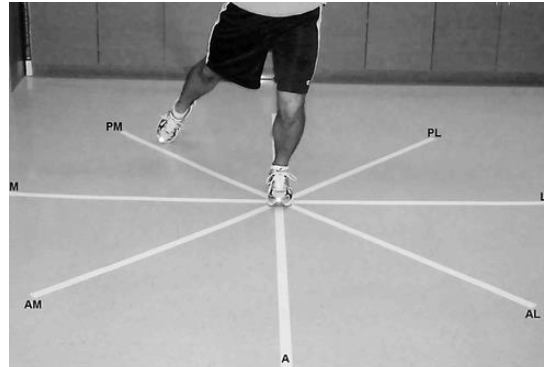


Figura 3: “*Star excursion balance test*” (SEBT)

Cone y sus colaboradores (8) combinan el análisis de variables durante la carrera y al finalizar la misma a través de un circuito de agilidad y de saltos sobre las dos piernas y a continuación sobre una (asignación de pierna de aterrizaje aleatoria).

En el resto de estudios no se analiza una tarea específica, sino que los datos cinéticos y cinemáticos son obtenidos directamente durante el protocolo de fatiga.

- Análisis de resultados y conclusiones:

Los resultados obtenidos en cada uno de los estudios se exponen en la tabla II. Los datos cinemáticos indican una disminución del ángulo de flexión de rodilla y de cadera en las tareas de aterrizaje tras la aparición de fatiga, lo que se traduce en un aterrizaje más erguido. La variable cinética medida de forma más frecuente es la GRF, en todos los estudios que la registraron su valor es mayor en un estado sin fatiga exceptuando el estudio realizado por Dominguesse (11) en el que se obtiene valores mayores tras la fatiga.

- Prevención de lesiones:

Quammen y su equipo (10) ven la necesidad de desarrollar programas de prevención de lesiones individualizados considerando las características

mecánicas de cada sujeto para trabajar sobre los factores de riesgo de forma individual; por ejemplo, si un atleta fatigado presenta una disminución del ángulo de flexión de rodilla durante los aterrizajes, se debe realizar un entrenamiento específico para aumentar el ángulo de flexión de rodilla. En esta línea Lucci *et al.* y Clark proponen añadir protocolos de fatiga en los programas de prevención de lesiones para incorporar estrategias que modifiquen la posición articular (9) y regular la rigidez del miembro inferior en condiciones extremas (24).

Hayes *et al.* (21) creen necesario añadir ejercicios excéntricos para aumentar la resistencia muscular y retrasar de este modo la aparición de fatiga.

Abt y sus colaboradores (19), no encuentran diferencias estadísticamente significativas entre los estados de prefatiga y posfatiga, sin embargo recomiendan no combinar altas intensidades con largas distancias. Los resultados de Comyns *et al.* (4) recomiendan también un tiempo de espera (300 segundos) tras la aparición de fatiga para que se normalice la situación y poder realizar un entrenamiento pliométrico.

Tabla 2: Características de los estudios experimentales incluidos en esta revisión (el significado de las abreviaturas se encuentra al final de la tabla)

Autor, año	Tipo de estudio	Objetivos	Variables	Protocolo de fatiga	Tarea	Resultados/Conclusiones	Prevención Lesiones
Steib et al. (2013)	EC NA	Comparar los efectos de la fatiga sobre control postural en sujetos con FAI, esguinces y controles	COP, TTS, distancia SEBT	Cinta rodante: inicio a 8 km/h, > 2 km/h cada 3 min. Hasta agotamiento	SEBT, JL	FAI y grupo control < SEBT medial, esguince < SEBT anterior > TTS > oscilación COP A-P y M-L	-
Girard et al. (2013)	EL	Investigar los cambios en la mecánica de carrera durante una carrera de 5 km	<p>Parámetros espacio-temporales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - T_c, T_a, - Duración de la zancada, tiempo de oscilación, frecuencia de zancada, longitud de zancada, - GRF, fuerza de frenado y fuerza de impulso. <p>Propiedades del modelo Spring-mass:</p> <ul style="list-style-type: none"> - k_{vert} - $V_{forward}$ 	Carrera de 5 km en circuito interior	5 km carrera	<p>Parámetros temporales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - > T_c, fase de frenado, oscilación, fuerza de frenado e impulso y duración total de la zancada - < T_a <p>Parámetros espaciales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - < frecuencia zancada, longitud de zancada <p>Propiedades del modelo Spring-mass:</p> <ul style="list-style-type: none"> - < $V_{forward}$ - < k_{vert} durante la carrera pero cambios finales no significativos. 	-

Dominguese et al. (2012)	EL	Investigar efectos de fatiga muscular sobre GRF. Diferencias entre géneros	GRF A-P y M-L	20-second WAT	60 cm DL	< GRF inicial, > GRF No diferencia significativa entre géneros.	-
Quammen et al. (2012)	EL	Determinar diferencias biomecánicas entre FAST-FP y SLO-FP	Rodilla: F, E, ABD, ADD, RI, RE. Cadera: F, ABD, ADD GRF	FAST-FP SLO-FP	Running-stop-jump	< F cadera y rodilla > ABD cadera y ADD y RI rodilla tras FAST-FP	Entrenamiento con fatiga
Hayes et al. (2011)	EL	Investigar el papel de la fatiga en la RE	sLT, SLTP y VO ₂ máx Economía de carrera Resistencia muscular isocinética de HE y KF	HIE	Carrera Excéntricos de HE y KF para resistencia muscular	Deterioro de RE en condiciones de fatiga. Este cambio en la RE se relaciona con la disminución de la resistencia de KF No existe correlación entre RE y resistencia de HE.	Programa de excéntricos
Lucci et al. (2011)	DMR	Determinar diferencias biomecánicas entre dos protocolos de fatiga	F-E, ABD-ADD, RI-RE de cadera, rodilla y tobillo GRF	FAST-FP SLO-FP	SS	< F rodilla y cadera < RI rodilla (> RI con FAST-FP) < GRF	Estrategias de modificación de posición articular
Comyns et al. (2011)	EL	Conocer los cambios biomecánicos que produce la fatiga durante un aterrizaje sobre una pierna.	T _a , T _c , RSI, GRF, k _{vert}	RBJ desde 30 cm hasta < de 90% altura máxima en 3 saltos consecutivos	DJ	< T _a , > T _c , < RSI tras protocolo; > RSI a los 300 s. < GRF 15 s. Normalización a 120-300 s < k _{vert} inicial. Normalización 300 s	Entrenamiento pliométrico a partir de los 300 s posteriores a fatiga.

Abt et al. (2011)	EL	Determinar si la fatiga provoca cambios en la cinemática de carrera	F de rodilla y pronación tobillo Aceleración de la cabeza y la pierna	Carrera exhaustiva en cinta rodante	Carrera	No diferencias estadísticamente significativas	No combinar altas intensidades con altas distancias
Patrek et al (2011)	EL	Examinar los cambios en el aterrizaje sobre una pierna y en la activación del glúteo medio tras un protocolo de fatiga	EMG abductores; GRF vertical; F y ABD rodilla; F y ABD cadera; momento de fuerza articular rodilla y cadera.	ABD cadera, 30° en decúbito lateral	40 cm DL	> amplitud media de EMG < frecuencia de potencia media > de ABD de cadera < de valgo de rodilla < momento de aducción de cadera y rodilla < GRF (no significativa)	-
Ross et al. (2010)	EL	Identificar los mecanismos que contribuyen a disminución de la fuerza muscular durante y tras un protocolo de fatiga.	EMG cuádriceps	20 km en cinta a velocidad elegida por sujeto.	CVM cuádriceps en carrera	< Fuerza máxima E rodilla al final del ejercicio. < activación VL	-

Cortes et al. (2013)	EL	Evaluar los efectos de un protocolo de fatiga sobre la biomecánica de MMII en tareas de cambio de dirección	GRF; F, ABD de rodilla; F y ABD de cadera; momento aductor de rodilla y cadera	FAST-FP	SJ, SS	- Contacto inicial: < F rodilla, > ABD rodilla, > F cadera, < ABD cadera; < momento ADD cadera - Apoyo medio: > F cadera, > F rodilla; > momento ADD rodilla; < momento ADD cadera y rodilla.	Empleo de datos cinemáticos y cinéticos para prevención
Cone et al. (2012)	EL	Examinar los cambios en los índices de fatiga en relación con los cambios biomecánicos de MMII	Rendimiento y esfuerzo percibido Rigidez e impedancia del MMII dominante (mecánica de movimiento).	Simulación de partido de fútbol.	Carrera, saltos y cambios de dirección	< rendimiento conforme avanza el tiempo < velocidad en cambios de dirección (+++dominante) No existen cambios significativos en la rigidez e impedancia vertical en el progreso de la simulación. Subanálisis: aumento de GRFv al principio de 1ª parte (rigidez), aumento de COM al inicio de la segunda parte (impedancia)	-

						< GRF > F cadera > Valgo en mujeres < ABD cadera y F rodilla en mujeres > ABD cadera y F rodilla en hombres > DF tobillo en aterrizaje < fuerzas de compresión y cizallamiento en cadera y rodilla < Momento E cadera y de rodilla; < momento ABD rodilla > ángulos plano sagital (++) SJ) < RI rodilla en contacto inicial < F en fase de apoyo medio < velocidad de sprint en ATH y NON > JS en ATH. < diferencia de JS entre pierna dominante y no dominante en ATH	
Kernozek et al. (2008)	EL	Determinar los cambios cinéticos y cinemáticos de MMII causados por la fatiga muscular	F, ABD de cadera F, ADD (varo) y ABD (valgo) de rodilla Momentos articulares GRF	Squat vertical "Smith Machine" (60% RM)	50 cm DL		
Cortes et al. (2012)	EL	Evaluar el efecto de FAST-FP sobre la cinética y cinemática de MMII	F, E, ABD, ADD, RI y RE de rodilla. F, ABD, ADD de cadera. GRF. Momentos articulares	FAST-FP	SJ, SS		
Clark (2009)	EC NA	Comparar la rigidez articular en atletas con entrenamiento excéntrico durante y tras un protocolo de fatiga.	Rigidez MMII Velocidad de Sprints	JS test	JS test		Regular JS en situaciones extremas < riesgo de lesión

Gerlach et al. (2005)	EL	Examinar los cambios provocados con la fatiga en GRF	Cadencia y longitud de paso. Carga y fuerza máxima de impacto y apoyo medio. Tasa de impacto inicial	VO ₂ máx discontinuo	Carrera	< cadencia y > longitud de paso < Pico y tasa de impacto inicial < Fuerza de impacto y tasa de impacto inicial	Mecánica de carrera alterada
------------------------------	----	--	--	---------------------------------	---------	--	------------------------------

EC: estudio controlado ; NA: no aleatorizado; COP: centro de presiones; TTS: tiempo de estabilización; SEBT: “*star excursion balance test*”; JL: “*jump landing*”; FAI: inestabilidad funcional crónica; A-P: antero-posterior; M-L: medio-lateral; EL: experimento de laboratorio; T_c: tiempo de contacto; T_a: tiempo aéreo; GRFv: fuerza de reacción vertical del suelo; MMII: miembro inferior; k_{vert}: rigidez vertical; V_{forward}: velocidad de avance; WAT: test anaeróbico de Wingate; DL: “*drop landing*” salto desde altura; FAST-FP: protocolo de fatiga de agilidad funcional a corto plazo; SLO-FP: protocolo de fatiga lento oxidativo lineal; F: flexión; E: extensión; ABD: abducción; ADD: aducción; RI: rotación interna; RE: rotación externa; RE: economía de carrera³; sLT: velocidad justo antes del primer incremento importante de lactato en sangre; sLTP: velocidad justo antes del segundo incremento súbito de lactato en sangre; VO₂ máx: consumo máximo de oxígeno; DMR: diseño de medidas repetidas; HE: extensores de cadera; KF: flexores de rodilla; HIE: ejercicio de alta intensidad SS: cambio de dirección imprevisto;; RSI: índice de fuerza de reacción; RBJ: saltos con rebote; EMG: electromiografía; CVM: contracción voluntaria máxima; VL: vasto lateral; SJ: “*stop-jump*”; COM: centro de masas; RM: repetición máxima; DR: flexión dorsal; “*JS test*”: “test de rigidez de la extremidad de apoyo”; ATH: atletas; NON: no atletas

³ Consumo de O₂ necesario para correr a una velocidad submáxima.

2.2 Análisis de la calidad de los artículos

El factor de impacto, es uno de los índices bibliométricos empleados en la actualidad para evaluar la producción y/o la calidad de la investigación científica. En esta revisión, además del factor de impacto (FI), se emplean otros índices como el número de citas que recibe el artículo en otras publicaciones y el índice H.

2.1.1 Factor de impacto (FI)

El FI se publica en la actualidad en un suplemento del *Science Citation Index (SCI)* con el nombre de *Journal Citation Reports (JCR)*. El JCR se edita anualmente dividiendo el número total de citas que reciben los artículos publicados en una revista durante los dos años previos, entre el número de artículos publicados en esa misma revista durante los dos años (25). Para esta revisión hemos empleado el Factor de Impacto del año 2013, ya que es el más actualizado.

Además del JCR, se emplea en esta revisión el SJR, accesible y disponible a través de SCOPUS.

En el gráfico 1 podemos observar la comparación entre el JCR y el SJR de las revistas en las que se publicaron los artículos incluidos en la revisión.

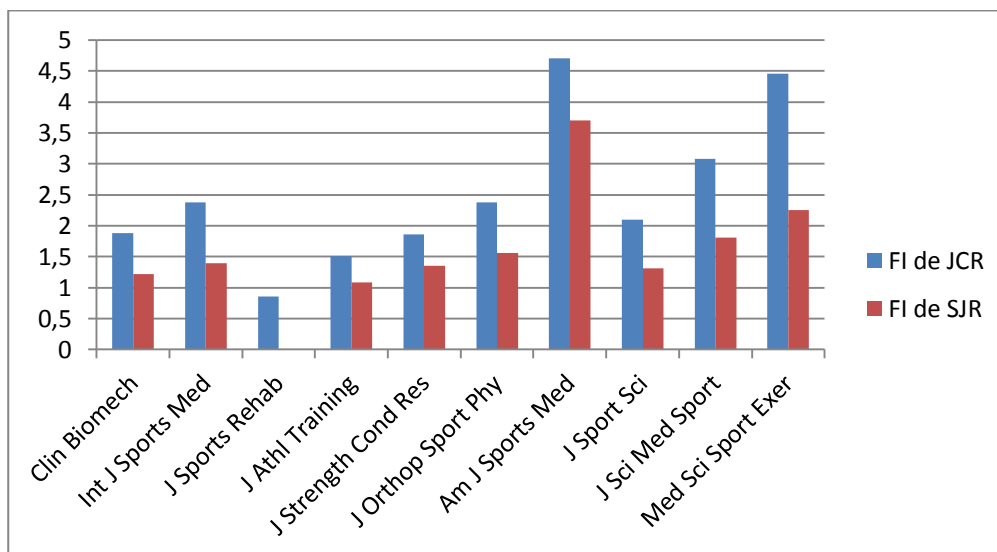


Gráfico 1: Comparación entre FI de JCR y FI de SJR

A pesar de que todos los artículos incluidos en la revisión tienen un factor de impacto mayor que 1'5 destacan los artículos publicados en *The American Journal of Sports Medicine* (7,22) con un JCR de 4'699 y un SJR de 3'705; el de la revista *Medicine & Science in Sports & Exercise* (23) con un JCR de 4'459 y un SJR de 2'253 y los de *Journal of Science and Medicine in Sport* (9,24) con un JCR de 3'079 y un SJR de 1'805.

Algunas revistas han publicado más de un artículo de los seleccionados: cuatro artículos han sido publicados por *Journal of Strength and Conditioning Research*; tres artículos en *Journal of Athletic Training*; dos en *Medicine & Science in Sports & Exercise*; y otros dos en *Journal of Science and Medicine in Sport*.

En el **Apéndice IV**, se adjunta la tabla en la que se analizan los factores de impacto de las revistas y sus valores normalizados.

2.2.1 Número de citas

El análisis de citas es otro de los indicadores más empleados. Nos permite conocer cuántos artículos han mencionado al artículo que estamos analizando. De este modo podemos suponer que cuántas más citas presente un artículo, su calidad, repercusión e interés, es mayor.

En la revisión hay cinco estudios experimentales que no han sido citados en ninguna ocasión; esto podría deberse a la obtención de resultados poco significativos o con poca repercusión pero también a su reciente publicación: *Steib* (2013) y *Girard* (2013). Destacan por el elevado número de citas que han obtenido *Gerlach*, 2005 con 35; *Kernozek*, 2008 con 21 y *Cortés*, 2012 con 14.



Gráfico 2: Número de citas de los estudios experimentales

2.3.1 Índice H

El índice h , propuesto por Hirsch en el 2005, es un indicador que estima el número de trabajos importantes publicados por un investigador. Un autor determinado tiene un índice h cuando h de sus publicaciones han recibido, al menos, h citas cada una, y el resto tiene h o menos citas (26).

El promedio del índice h de los autores principales de los artículos incluidos en la revisión es de 5,625. De todos ellos destacan: Kernozek (índice h de 21), Clark (índice h de 11), Abt y Ross (ambos con índice h de 9).

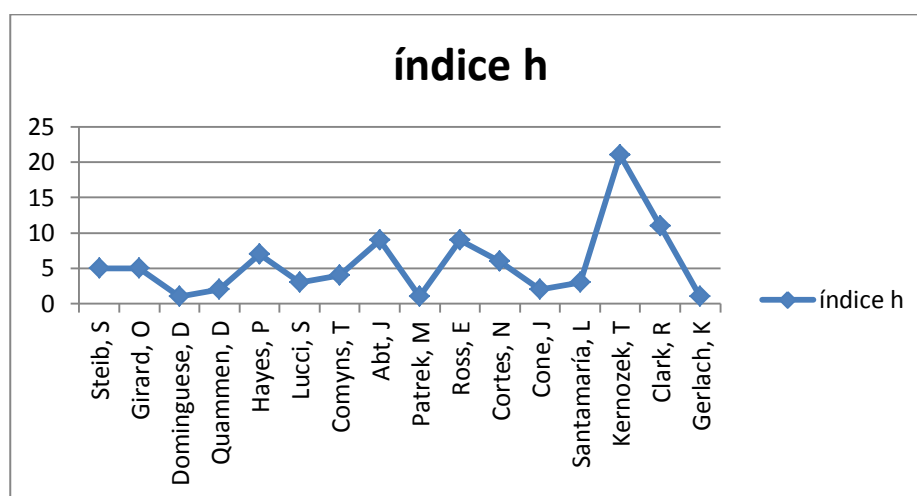


Gráfico 3: Índice h de los autores según Scopus

La cantidad-calidad de la producción científica de estos autores se ve reflejada con este índice, de tal modo que por ejemplo, en el caso de Kernozek T, teniendo 71 documentos publicados, 21 de sus artículos han sido citados por lo menos en 21 ocasiones (gráfico 4).

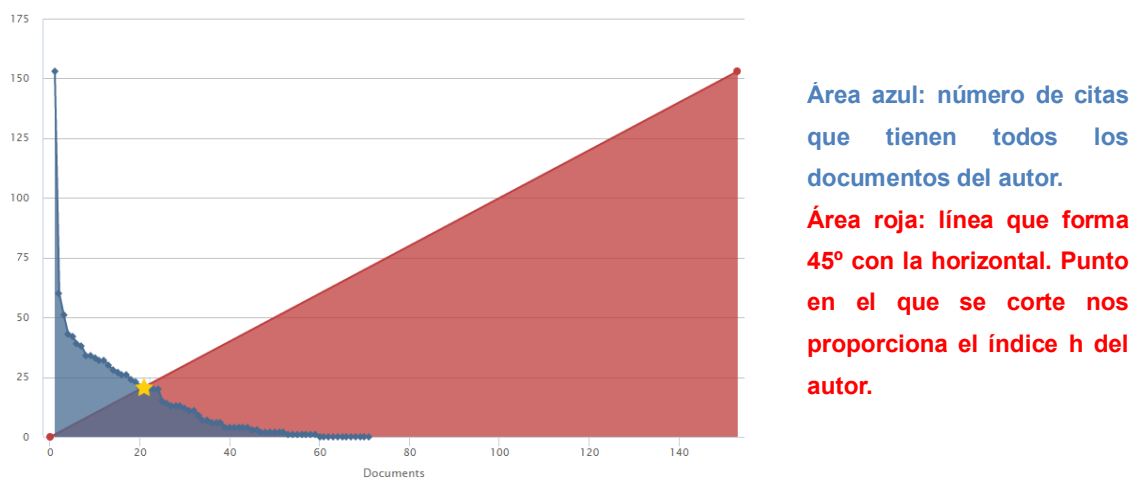


Gráfico 4: Índice H de Kernozek

Google Scholar Metrics es un producto bibliométrico, gratuito y de libre acceso, que ofrece el impacto de las revistas científicas empleando el índice *h5* como criterio de ordenación (6). Las revistas con un mayor índice *h5* de esta revisión, son Journal of Strength and Conditioning Research (índice *h5* de 52), Medicine and Science in Sports Exercise (índice *h5* de 66) y American Journal of Sports Medicine (índice *h5* de 75).

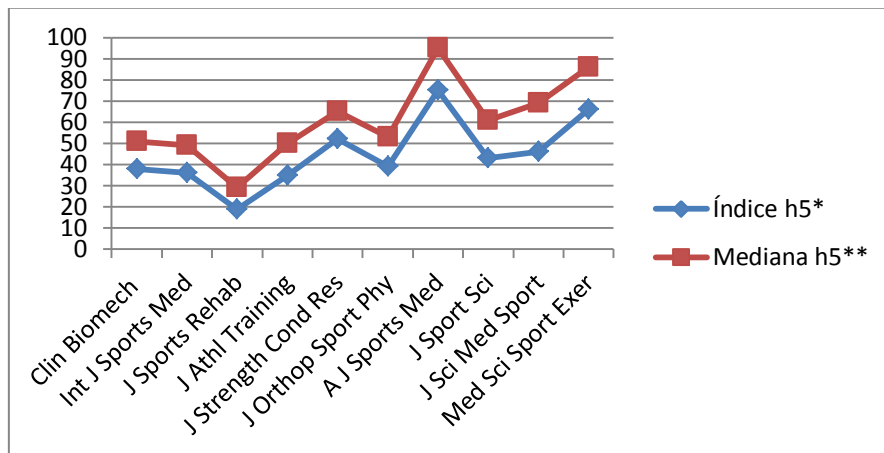


Gráfico 5: Índice *h5* de las revistas según Google Scholar Metrics

DISCUSIÓN

Entre los factores de riesgo modificables (**Apéndice V**) nos encontramos las características neuromusculares del atleta, y dentro de ellas la aparición de fatiga (27). Conocer los cambios biomecánicos que se producen como consecuencia de una condición de fatiga en el miembro inferior es importante para poder establecer estrategias que eviten la aparición de lesiones relacionadas con esta causa.

La mayoría de los estudios incluidos en la revisión coinciden en la disminución del ángulo de flexión de rodilla y de cadera en las tareas de aterrizaje (5, 7, 9,10) y en el descenso de las fuerzas de reacción del suelo tras la aparición de fatiga en atletas (6,9). En contraposición a estos artículos, Dominguese y sus colaboradores encuentran una reducción inicial de la GRF, seguido de un incremento de la GRF conforme la fatiga va progresando. A pesar de que no consiguen dar una explicación de por qué sucede esto debido a la falta de literatura, proponen que la variación de la GRF se relaciona directamente con los cambios cinemáticos que se producen y con el aumento del tiempo en el que la fuerza pasa del antepié al retropié (11).

La electromiografía (EMG) es la prueba de elección para medir la actividad muscular voluntaria tanto por Patrek *et al.* como por Ross *et al.* A pesar de que aparentemente existe una contradicción de resultados, Patrek y sus colaboradores observan una menor fuerza del glúteo medio asociada a un aumento de la actividad EMG en condiciones de fatiga. La disminución de la capacidad de generar fuerza podría asociarse a una disminución en el número de unidades motoras reclutadas, sin embargo esto no es lo que está sucediendo ya que existe de forma paralela un aumento de la actividad EMG. Patrek *et al.* proponen una disminución de la eficacia en los puentes cruzados en condiciones de fatiga, lo que va a ocasionar una disminución de la activación muscular (18). Ross *et al.* obtuvieron una disminución de la activación voluntaria máxima en el músculo cuádriceps que se mantiene hasta los 40 minutos después del ejercicio, sin embargo, al contrario que los autores anteriores obtienen una correlación entre esta disminución y reducción en la amplitud del EMG (22). La diferente composición entre el cuádriceps y el glúteo medio parece ser explicación, de esta discrepancia de resultados según Patrek *et al.* El cuádriceps tiene un mayor porcentaje de fibras tipo II, mientras que el glúteo medio está constituido en su

mayoría por fibras tipo I. Así las fibras tipo I pueden ser más propensas a aumentar la amplitud del EMG, mientras la fuerza muscular se va a reducir como consecuencia de la menor eficacia de los puentes cruzados en condiciones de fatiga (18).

Las lesiones más frecuentes en el miembro inferior son las relacionadas con el LCA, especialmente si estas se producen sin contacto (28) y los esguinces de tobillo (29), que pueden provocar una inestabilidad crónica. Los participantes de 16 de los estudios incluidos son sujetos sanos que realizan deportes que implican saltos, cambios de dirección inesperados o carrera. Steib et al. deciden realizar una comparación de la influencia de la fatiga en voluntarios con esguinces de tobillo, unos con inestabilidad funcional y otros sujetos sanos, y su principal conclusión es que, con la aparición de fatiga, existe una afectación similar del control postural estático y dinámico en los tres grupos, sin presentarse diferencias significativas entre ellos.

Por otro lado, los participantes de los estudios experimentales son mayoritariamente del sexo femenino. Si comparamos la incidencia de lesiones LCA entre los sexos, la población femenina tiene más posibilidades de sufrir una lesión de este tipo, relacionada o no con la aparición de fatiga (28,30,31); además del sexo, la disciplina deportiva también es determinante en la producción de una lesión (gimnastas, jugadoras de fútbol y baloncesto son las atletas que mayor riesgo tienen (32)). Kernozek y sus colaboradores, obtienen diferencias entre los géneros en relación con la cinemática, con la aparición de fatiga se produce un aumento de la actitud en valgo y una menor flexión de la rodilla durante las tareas de aterrizaje, lo que va a provocar un aumento del riesgo de lesión de LCA en el género femenino (7). Por otro lado, Dominguese *et al.* dividen a los participantes del estudio en dos grupos, para comprobar si existen diferencias en el aterrizaje dependiendo del género, el análisis de datos muestra valores de GRF similares en los dos grupos en las condiciones de prefatiga y postfatiga, por lo que se concluye con que el género no influye en la cinética de aterrizaje (11). A pesar de que encontramos discrepancias entre si el género influye o no en el riesgo de lesión, la mayoría de los estudios corroboran una mayor probabilidad de lesiones en mujeres atletas.

Uno de los factores de riesgo modificables que influyen en la aparición de lesiones (**Apéndice V**) es la ropa deportiva empleada por los atletas. En general,

en todos los estudios incluidos en la revisión, los participantes emplean la ropa y el calzado con el que realizan habitualmente el entrenamiento o con el empleado durante la competición. Siguiendo esta línea, los participantes del estudio realizado por Dominguese et al. (11) emplean para realizar el protocolo de fatiga la ropa deportiva habitual, sin embargo, para realizar las tareas de aterrizaje, son instruidos para descalzarse previamente. Así se elimina la interacción del calzado en los valores obtenidos de la GRF.

El factor de riesgo modificable más relevante para la revisión sistemática es la fatiga. Para evocar esta situación y poder analizar los cambios que se producen, se realizan protocolos de fatiga. Existen diversos protocolos de fatiga propuestos por los estudios incluidos en la revisión, en algunos casos existen diferencias importantes entre ellos, lo que puede contribuir a la existencia de discrepancia en los resultados. Si el protocolo de fatiga empleado no simula las demandas físicas de la competición, como sucede con el protocolo propuesto por Patrek *et al.*, que solo provoca fatiga de la musculatura abductora de cadera (18), los resultados obtenidos no pueden extrapolarse a lo que sucede en la actividad deportiva habitual. Los protocolos funcionales incorporan múltiples actividades atléticas, que implican diferentes grupos musculares, simulando de este modo la participación deportiva y proporcionando resultados más relevantes de la influencia de la progresión de fatiga. Sin embargo, también se argumenta que los protocolos funcionales no son realizados durante la propia competición. A pesar de que las características de temperatura, humedad, cantidad de O₂, terreno, etc. se intenten simular dentro de un entorno de laboratorio, no existe una réplica fisiológica ni biomecánica de las demandas reales de la actividad física. Por ello, lo ideal sería realizar el estudio durante la propia competición.

Establecer criterios de aparición de fatiga es complicado, independientemente del protocolo utilizado. Algunos autores consideran que el paciente ha alcanzado la fatiga máxima cuando se producen dos de los siguientes criterios: 90% de la frecuencia cardíaca máxima (FCM), cociente respiratorio mayor de 1.1⁴, meseta en la curva de VO₂máx., o incapacidad para seguir corriendo (5,9,10); otros prefieren el empleo del EMG para comprobar cuando se está produciendo la fatiga muscular (18,22). Por ejemplo, durante los

⁴ Relación entre la producción de CO₂ y O₂. Si es mayor que uno, existe una mayor concentración de CO₂ en sangre que no puede ser compensada, se conoce este momento como umbral anaeróbico (el ácido láctico empieza a acumularse y desciende el rendimiento muscular)

protocolos que incorporan actividad de alta intensidad, cuya duración es variable -hasta que el individuo no sea capaz de continuar-, no se puede determinar si cuando se finaliza el protocolo existe realmente fatiga muscular o si, más bien, el participante no puede continuar debido a la aparición de un compromiso del sistema cardiopulmonar (19). La efectividad de cualquier protocolo en la inducción y detección de fatiga depende por tanto de la influencia de otros tipos de fatiga como puede ser la cardiopulmonar o por el empleo de criterios subjetivos que marquen la aparición de esta situación, como por ejemplo la escala de Borg, en la que se indica el esfuerzo percibido por el paciente –de 6 a 20- integrando información de músculos, articulaciones periféricas, sistema cardiovascular, sistema respiratorio y sistema nervioso central (33).

La diversidad de tareas de aterrizaje empleadas para el análisis de los cambios entre las condiciones previas al protocolo y tras la aparición de fatiga también provoca la aparición de resultados dispares. Con estas actividades se pretende simular la fase de aterrizaje durante la carrera, por lo que lo indicado sería realizar un aterrizaje únicamente sobre un miembro inferior. En general, en los estudios que emplean tareas de aterrizaje sobre una pierna, no existe una asignación aleatoria del miembro inferior, sino que se realiza con la pierna dominante⁵ para el análisis de las variables biomecánicas (4-6,8-11,18). Gerlach y sus colaboradores realizaron un análisis previo de los dos miembros inferiores, al no obtener diferencias significativas entre ellos, emplearon un valor promedio para expresar los resultados definitivos de su investigación (23). Entre los autores que optan por otra estrategia de análisis nos encontramos con los que prefieren realizar el análisis biomecánico en el momento deportivo, sin emplear ninguna tarea específica de aterrizaje (19-22,24), los resultados de estos estudios son quizás más representativos al no interferir variables como el aprendizaje de la tarea en cuestión o periodos de tiempo entre el protocolo de fatiga y el análisis biomecánico de los aterrizajes.

Para el análisis la mecánica de carrera es común emplear el modelo “*spring-mass*”, con él se compara el comportamiento del cuerpo humano durante la carrera con el comportamiento de un muelle o resorte. El “modelo Spring-mass”, descrito inicialmente por McHahon and Cheng, quienes dicen que “la pierna es un resorte lineal y la masa corporal cae sobre él con una velocidad vertical hacia

⁵ La pierna dominante es definida como aquella que utilizaría el sujeto para lanzar una pelota lo más lejos posible.

abajo”, se emplea para analizar los cambios en el miembro inferior durante la carrera (34). El modelo se formula para saltos estáticos pero también para movimientos de avance como puede ser caminar o correr. Se proponen una serie de variables que permiten describir el movimiento realizado entre ellas las más importantes son, la rigidez vertical (k_{vert}), la rigidez de modelo resorte de la pierna (k_{leg}) y la velocidad de avance (V_{forward}). Tanto Comyns y sus colaboradores como Girard *et al.* coinciden en una disminución de ambas variables con la aparición de fatiga (4,20) Girard *et al.* se centra además en el análisis de parámetros espacio-temporales, se encuentra con aumento en el tiempo de contacto, de la duración de la fase de impulso y de la duración de la fase de frenado, así como la duración total de la zancada, el tiempo aéreo por el contrario presenta una menor duración, al igual que la frecuencia y la longitud de zancada, que también son menores (20).

La rigidez o “stiffness”, mencionada previamente, se define como la resistencia de un cuerpo a la deformación, depende de componentes pasivos (huesos, tendones o ligamentos) y de componentes activos (músculos). En el miembro inferior, su valor se obtiene de la relación entre el pico de la fuerza de reacción vertical del suelo (GRFv) y el desplazamiento del centro de masas (COM) (35) y se calcula durante los movimientos habituales de la actividad deportiva: correr, saltar o cambiar de dirección. Cone y sus colaboradores (8) aprecian una disminución del rendimiento conforme avanza la simulación de la actividad deportiva, sin embargo no consiguen demostrar cambios significativos ni en la rigidez tras la aparición de la fatiga. Por el contrario, Clark obtiene resultados que evidencian una relación entre la rigidez y el nivel de fatiga (24), de tal modo que los sujetos entrenados, en los que la fatiga aparece de forma tardía, existe una mayor capacidad de regular la rigidez.

Una vez que se conoce la influencia de la fatiga en la producción de lesiones, se necesitan conocer estrategias que permitan elaborar un plan de prevención. Para ello, Hayes *et al.* (21) realizan un estudio para investigar los cambios en la economía de carrera y el papel de la resistencia muscular en un estado de fatiga; concluyen con la idea de que existe una correlación entre el deterioro en la economía de carrera y la disminución de la resistencia de los flexores de rodilla a las fuerzas excéntricas como consecuencia de la aparición de fatiga. Los resultados de este estudio indican que la fuerza muscular excéntrica puede jugar un papel relevante en el rendimiento: cuanta mayor sea la resistencia de

los flexores de rodilla, los cambios inducidos por la fatiga se van a atenuar. Siguiendo esta línea, el aumento de la resistencia muscular a través de trabajo excéntrico puede establecerse como una estrategia de acondicionamiento para evitar la aparición de fatiga y las lesiones subsecuentes a ella. Hayes y sus colaboradores sugieren realizar entrenamiento con ejercicios pliométricos, ejercicios excéntricos para aumentar la resistencia, carreras descendiendo pendientes y carreras de alta velocidad, para mejorar la economía de carrera y en última instancia retrasar la aparición de fatiga. En la misma línea, Clark evidencia que aquellos atletas que se adiestran a una intensidad máxima y que emplean contracciones excéntricas durante su entrenamiento, son más eficientes a la hora de regular la rigidez articular, lo que reduce el riesgo de lesiones y permite mejorar su rendimiento (24).

Con la aparición de la fatiga surge la necesidad de conocer la duración de los cambios biomecánicos que con ella se ocasionan, Comyns et al. proponen un tiempo de entre 120 y 300 segundos para que se restauren las fuerzas de reacción del suelo y recomiendan esperar un mínimo de 300 segundos para comenzar a realizar actividades pliométricas (4). Ross et al. realizan mediciones electromiográficas de la musculatura extensora de rodilla a los 20 y a los 40 minutos de finalizar el ejercicio, pretendiendo con ello saber cuándo se produce la reversión de la situación de fatiga. La contracción voluntaria máxima en estas mediciones fue similar al momento de fatiga máxima, incluso se redujo un 14% y un 15% respectivamente a los 20 y 40 minutos, la amplitud del EMG tampoco tuvo modificaciones significativas. Esto sugiere un mantenimiento de la fatiga central tras una carrera prolongada tiempo después de la finalización del ejercicio (22). Sería necesario seguir realizando mediciones tras alcanzar la fatiga máxima y finalizar la actividad para comprobar en qué momento se produce la recuperación de las condiciones basales. Esta tarea requiere de una complejidad importante ya que se obtendrían un gran número de datos para analizar en cada uno de los participantes y además requiere de un tiempo que no se puede predecir antes de realizar el estudio, probablemente este sea el motivo de que la investigación de estas variables sea escasa, hasta tal punto de no encontrar resultados concluyentes en esta revisión bibliográfica.

Por último entre las limitaciones de la revisión sistemática podemos incluir la discrepancia en los protocolos de fatiga empleados, lo que no permite correlacionar plenamente los resultados obtenidos en unos u otros artículos.

Además no existe un método consistente que indique que el protocolo esté realmente induciendo fatiga, por lo que no se puede asegurar con total firmeza que el comportamiento mecánico sea el que realmente se produce en condiciones de fatiga. Además, aunque la mayoría de los estudios eligen tareas de aterrizaje para el análisis de los cambios biomecánicos del miembro inferior producidos por la fatiga, la disparidad de las tareas empleadas puede limitar la correlación de los resultados entre los estudios.

CONCLUSIONES

- La fatiga afecta a la biomecánica del miembro inferior, en especial durante las tareas de aterrizaje sobre una única extremidad.
- Los protocolos de fatiga más funcionales parecen alcanzar resultados más reales, esto puede deberse a que reflejan mejor las demandas del deporte en cuestión. En el futuro, los estudios tendrían que ser capaces de establecer un protocolo funcional que proporcione una mayor evidencia en los cambios biomecánicos asociados a la aparición de fatiga.
- Con la fatiga se produce un descenso de las fuerzas de reacción del suelo, lo que refuta la hipótesis planteada inicialmente. La disminución de las GRF actúa como mecanismo protector, evitando la aparición de lesiones.
- La aparición de fatiga provoca la disminución de los ángulos de flexión de cadera y rodilla, los atletas realizan un aterrizaje más erguido que puede provocar una disminución de la amortiguación durante las tareas de aterrizaje, constituyendo un factor de riesgo para la producción de lesiones.
- Con la fatiga se produce un aumento del valgo y de la rotación interna de rodilla, especialmente en el sexo femenino, constituyendo un aumento del riesgo de lesión de ligamento cruzado anterior.
- Con la aparición de fatiga se produce cambios en los parámetros espacio- temporales de la zancada: aumento tiempo de contacto, fase de impulso, fase de frenado y duración total de la zancada; disminución de tiempo aéreo, frecuencia de zancada y la longitud de zancada.
- El entrenamiento de la fuerza muscular excéntrica permite no solo aumentar el rendimiento, sino también retrasar la aparición de fatiga, lo que reduce el riesgo de que se produzcan lesiones.

- Tras finalizar el ejercicio, la fatiga se mantiene de forma prolongada en el tiempo. Las investigaciones futuras han de ir orientadas a conocer cuánto tiempo se tardan en recuperar las condiciones basales, es decir, cuándo el atleta se recupera de las condiciones de fatiga.
- A pesar de que la finalidad de los estudios es obtener datos cinemáticos y cinéticos que permitan establecer pautas para la prevención de lesiones y para la elaboración de programas de entrenamiento, pocos son los que llegan a una conclusión firme en relación a este objetivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Stanfield C. Principios de fisiología humana. 4th ed. Madrid: Pearson Educación; 2011.
- (2) Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 2001 Oct;81(4):1725-1789.
- (3) Beretta-Piccoli M, D'Antona G, Barbero M, Fisher B, Dieli-Conwright CM, Clijisen R, et al. Evaluation of central and peripheral fatigue in the quadriceps using fractal dimension and conduction velocity in young females. *PLoS One* 2015 Apr 16;10(4):e0123921.
- (4) Comyns TM, Harrison AJ, Hennessy LK. An investigation into the recovery process of a maximum stretch-shortening cycle fatigue protocol on drop and rebound jumps. *J Strength Cond Res* 2011 Aug;25(8):2177-2184.
- (5) Cortes N, Greska E, Kollock R, Ambegaonkar J, Onate J. Changes in lower extremity biomechanics due to a short-term fatigue protocol. *J Athl Train* 2013;48(3):306-13.
- (6) Cortes N, Quammen D, Lucci S, Greska E, Onate J. A functional agility short-term fatigue protocol changes lower extremity mechanics. *J Sports Sci* 2012;30(8):797-805.
- (7) Kernozek T, Torry M, Iwasaki M. Gender differences in lower extremity landing mechanics caused by neuromuscular fatigue. *Am J Sports Med* 2008;36(3):554-65.
- (8) Cone J, Berry N, Goldfarb A, Henson R, Schmitz R, Wideman L, et al. Effects of an individualized soccer match simulation on vertical stiffness and impedance. *J Strength Cond Res* 2012;26(8):2027-36.
- (9) Lucci S, Cortes N, Van Lunen B, Ringleb S, Onate J. Knee and hip sagittal and transverse plane changes after two fatigue protocols. *J Sci Med Sport* 2011 Sep;14(5):453-459.
- (10) Quammen D, Cortes N, Van Lunen BL, Lucci S, Ringleb SI, Onate J. Two different fatigue protocols and lower extremity motion patterns during a stop-jump task. *J Athl Train* 2012 Jan-Feb;47(1):32-41.
- (11) Dominguese DJ, Seegmiller J, Krause BA. Alterations in peak ground-reaction force during 60-cm drop landings caused by a single session of repeated Wingate anaerobic tests. *J Sport Rehabil* 2012 Nov;21(4):306-312.
- (12) Steib S, Hentschke C, Welsch G, Pfeifer K, Zech A. Effects of fatiguing treadmill running on sensorimotor control in athletes with and without functional ankle instability. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 2013 Aug;28(7):790-795.
- (13) Wikstrom EA, Powers ME, Tillman MD. Dynamic Stabilization Time After Isokinetic and Functional Fatigue. *J Athl Train* 2004 Sep;39(3):247-253.
- (14) Martín J. Revisiones Sistemáticas en las Ciencias de la Vida. ¿Qué es una revisión sistemática de la evidencia científica? Castilla-La Mancha: In FISCAM; 2006. p. 27-38.

- (15) Julian P. T. Higgins, Sally Green. *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*. 1st Edition ed. London: John Wiley & Sons; 2009.
- (16) Eccles M, Clapp Z, Grimshaw J, Adams PC, Higgins B, Purves I, et al. Developing valid guidelines: methodological and procedural issues from the North of England Evidence Based Guideline Development Project. *Qual Health Care* 1996 Mar;5(1):44-50.
- (17) García JA, Ponce F, Ramírez Y, Lino L. *Introducción a la metodología de la investigación en ciencias de la salud*. 1st ed. México: McGraw-Hill; 2011.
- (18) Patrek MF, Kernozek TW, Willson JD, Wright GA, Doberstein ST. Hip-abductor fatigue and single-leg landing mechanics in women athletes. *J Athl Train* 2011 Jan-Feb;46(1):31-42.
- (19) Abt JP, Sell TC, Chu Y, Lovalekar M, Burdett RG, Lephart SM. Running kinematics and shock absorption do not change after brief exhaustive running. *J Strength Cond Res* 2011 Jun;25(6):1479-1485.
- (20) Girard O, Millet GP, Slawinski J, Racinais S, Micallef JP. Changes in running mechanics and spring-mass behaviour during a 5-km time trial. *Int J Sports Med* 2013 Sep;34(9):832-840.
- (21) Hayes PR, French DN, Thomas K. The effect of muscular endurance on running economy. *J Strength Cond Res* 2011 Sep;25(9):2464-2469.
- (22) Ross EZ, Goodall S, Stevens A, Harris I. Time course of neuromuscular changes during running in well-trained subjects. *Med Sci Sports Exerc* 2010 Jun;42(6):1184-1190.
- (23) Gerlach KE, White SC, Burton HW, Dorn JM, Leddy JJ, Horvath PJ. Kinetic changes with fatigue and relationship to injury in female runners. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37(4):657-663.
- (24) Clark RA. The effect of training status on inter-limb joint stiffness regulation during repeated maximal sprints. *Journal of Science and Medicine in Sport* 2009;12(3):406-410.
- (25) Casal GB. Evaluación de la calidad de los artículos y de las revistas científicas: Propuesta del factor de impacto ponderado y de un índice de calidad. *Psicothema* 2003;15(1):23-35.
- (26) Dorta-González P, Dorta-González MI. Indicador bibliométrico basado en el índice h. *Revista Española de Documentación Científica* 2010;33(2):225-245.
- (27) Cameron KL. Commentary: Time for a paradigm shift in conceptualizing risk factors in sports injury research. *J Athl Train* 2010 Jan-Feb;45(1):58-60.
- (28) Arendt EA, Agel J, Dick R. Anterior cruciate ligament injury patterns among collegiate men and women. *J Athl Train* 1999 Apr;34(2):86-92.
- (29) Fong DT, Hong Y, Chan LK, Yung PS, Chan KM. A systematic review on ankle injury and ankle sprain in sports. *Sports Med* 2007;37(1):73-94.

- (30) Agel J, Arendt E, Bershadsky B. Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer: a 13-year review. *Am J Sports Med* 2005;33(4):524-30.
- (31) Arendt E, Dick R. Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer. NCAA data and review of literature. *Am J Sports Med* 1995;23(6):694-701.
- (32) Hootman J, Dick R, Agel J. Epidemiology of collegiate injuries for 15 sports: summary and recommendations for injury prevention initiatives. *J Athl Train* 2007;42(2):311-9.
- (33) Borg G. Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. *Scand J Work Environ Health* 1990;16 Suppl 1:55-58.
- (34) McMahon TA, Cheng GC. The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? *J Biomech* 1990;23 Suppl 1:65-78.
- (35) Brughelli M, Cronin J. A review of research on the mechanical stiffness in running and jumping: methodology and implications. *Scand J Med Sci Sports* 2008 Aug;18(4):417-426.

APÉNDICES

I. Abreviaturas

- GRF: fuerza de reacción del suelo.
- MESH: Medical Subject Heading.
- UDC: Universidad de La Coruña.
- JCR: Journal Citation Reports.
- WOS: Web of Science.
- SCR: SCImago Journal Rank.
- LCA: ligamento cruzado anterior.
- FAST-FP: “*Functional Agility Short-Term Fatigue Protocol*”.
- SLO-FP: “*Slow Linear Oxidative Fatigue Protocol*”.
- VO_2 máx: consumo máximo de oxígeno.
- ABD: abducción.
- SEBT: “*star excursion balance test*”.
- FI: factor de impacto.
- EMG: electromiografía.
- FCM: frecuencia cardíaca máxima.
- k_{vert} : rigidez vertical.
- V_{forward} : velocidad de avance.
- GRFv: fuerza de reacción vertical del suelo.
- COM: centro de masas.

II. Características de las bases de datos empleadas

MEDLINE-PubMed

- Productor: National Library of Medicine (Estados Unidos).
- Volumen de información: PubMed comprende más de 24 millones de citas de la literatura biomédica de MEDLINE, revistas de ciencias de la vida, y libros en la misma línea.
- Cobertura cronológica: la base de datos existe desde 1950, en ella existen citas y resúmenes de más de 15 millones de artículos seleccionadas por la National Library of Medicine (NLM) desde 1966.
- Cobertura temática: Medicina y ciencias de la salud.
- Tesauro: Medical Subject Headings (MeSH).
- Otras características: actualización diaria, cobertura geográfica internacional, idioma de trabajo inglés.
- Acceso: libre y gratuito que proporciona la NLM desde el enlace <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>. PubMed permite realizar búsquedas de consultas clínicas, proporcionando enlaces a artículos relacionados y la posibilidad de exportar estos artículos a gestores bibliográficos o a archivos en diferentes formatos.

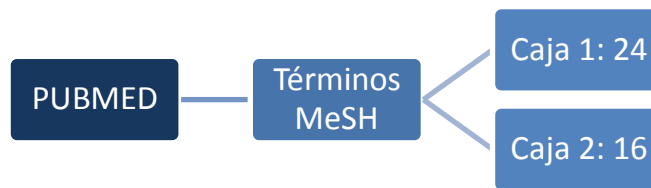
SCOPUS

- Editor: Elsevier.
- Volumen de información: 19.400 publicaciones científicas revisadas por expertos y más de 1.900 revistas de libre acceso. 49 millones de registros, de los cuales contienen abstract un 78%.
- Cobertura cronológica: desde 1960.
- Cobertura temática: se divide en cuatro áreas principales: “Life Sciences”, “Health Sciences”, “Physical Sciences” y “Social Sciences”.
- Tesauro: no posee tesauro propio, por lo que se emplean los tesauros de otras bases de datos como PubMed para equiparar las búsquedas.
- Otras características: actualización diaria, cobertura geográfica internacional, idioma de trabajo inglés.
- Acceso: el acceso a esta base de datos es a través de una suscripción individual o por pertenecer a un organismo suscrito, si estamos suscritos podemos acceder a la base de datos a través del siguiente enlace, <http://www.scopus.com/home.url>.

PEDro

- Creador: Centro de Fisioterapia Basada en la Evidencia en el George Institute for Global Health.
- Volumen de información: podemos encontrar más de 29.000 ensayos aleatorios controlados, revisiones sistemáticas y guías de práctica clínica de Fisioterapia.
- Cobertura cronológica: la base de datos se crea en 1999.
- Cobertura temática: base de datos sobre Fisioterapia Basada en la Evidencia.
- Tesauro: no posee tesauro propio, se emplea el tesauro de otras bases de datos como Pubmed para equiparar las búsquedas.
- Otras características: actualización mensual.
- Acceso: acceso libre y gratuito a través del siguiente enlace, <http://www.pedro.org.au/spanish/>.

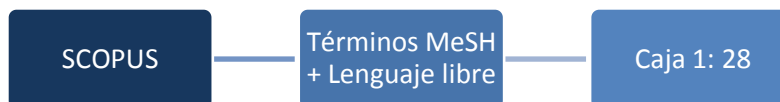
III. Detalle de los resultados de búsqueda en cada una de las bases de datos



Nota:

Caja 1: ("Fatigue"[Mesh] OR "Muscle Fatigue"[Mesh]) AND "Lower Extremity"[Mesh] AND "Athletes"[Mesh]

Caja 2: "Fatigue"[Mesh] AND "Lower Extremity"[Mesh] AND "prevention and control"[Subheading] AND "Sports"[Mesh]



Nota:

Caja 1: KEY (*fatigue* AND "lower extremity") AND athletes AND prevention



Nota:

Caja 1: "fatigue" AND "athletes"

IV. Factor de impacto según Journal Citations Reports y SCImago Journal Rank

	FI de JCR	FI de SJR
Clinical biomechanics (Bristol, Avon)	1,880	1,223
International Journal of Sports Medicine	2,374	1,392
Journal of Sport Rehabilitation	0,855	0,631
Journal of Athletic Training	1,509	1,081
Journal of Strength and Conditioning Research	1,858	1,305
Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy	2,376	1,561
American Journal of Sports Medicine	4,699	3,705
Journal of Sports Sciences	2,095	1,311
Journal of Science and Medicine in Sport	3,079	1,805
Medicine & Science in Sports & Exercise	4,459	2,253

FI: factor de impacto; JCR: "Journal Citations Reports"; SJR: "SCImago Journal Rank"

V. Factores de Riesgo de producción de lesiones.

Factores de riesgo modificables	Factores de riesgo no modificables
<p>Ambientales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Condiciones meteorológicas. - Superficie de entrenamiento o competición. - Ropa deportiva. - Material ortopédico. 	<p>Ambientales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Situaciones inesperadas en la actividad deportiva.
<p>Anatómicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Composición corporal. - Índice de masa corporal. 	<p>Anatómicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Alineación postural: ángulo Q, valgo de rodilla. - Propiedades y características de los tejidos.
<p>Neuromusculares:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fuerza muscular. - Parámetros de activación muscular. - Rigidez muscular. - Fatiga muscular. - Nivel de actividad física. 	<p>Demográficos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Edad. - Antecedentes personales y familiares de lesión. - Genética. - Altura. - Raza.
	<p>Hormonales:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ciclo menstrual. - Concentraciones hormonales.

