



REVISIÓN

Importancia de la sensibilidad plantar en la regulación del control postural y del movimiento: revisión

Caleb Araguas Garcia^{a,b,*}, Francisco Corbi Soler^b y Carles Vergés Salas^c

^a *Clínica podológica la Torrassa, Universitat de Barcelona, Barcelona, España*

^b *Departamento de Salud, Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, Centro de Lleida, Universitat de Lleida, Lleida, España*

^c *Ensenyament de Podologia, Departament de Ciències clíniques, Facultat de Medicina i Ciències de la Salut, Universitat de Barcelona, Barcelona, España*

Recibido el 28 de abril de 2016; aceptado el 12 de septiembre de 2016

PALABRAS CLAVE

Sensibilidad;
Piel;
Pie;
Deporte;
Postura;
Lesión

Resumen El objetivo de esta revisión es analizar la influencia de la sensibilidad plantar en la mejora de la capacidad de reequilibración y de gestión del movimiento, analizando los mecanismos que permiten valorarla y describiendo los factores que en ella influyen. Para ello se realizó una búsqueda sistemática de la bibliografía publicada entre 2000 y 2016, en las bases de datos PubMed, Web of Science, Sport-Discus y en las referencias citadas en los artículos recuperados, cuyo idioma de publicación fuera español o inglés. Un total de 9 artículos fueron recuperados y analizados.

La mayoría de los estudios sugieren que, la retroalimentación sensorial del pie resulta fundamental en el mantenimiento de los patrones generales (posturales y de desplazamiento) y específicos (deportivos). La alteración de la cantidad o calidad de la información aferente plantar no solo parece alterar la creación de los diferentes patrones, sino que podrá incrementar el riesgo de aparición de lesiones.

© 2016 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

KEYWORDS

Sensitivity;
Skin;
Foot;
Sport;
Posture;
Injury

Importance of plantar sensitivity in the regulation of postural control and movement: Review

Abstract The objective of this review is to analyse the influence of plantar sensitivity in improving the ability of re-balancing and movement management, by analysing the mechanisms that allow valuing and describing the factors that influence it. This required a systematic search of the literature published between 2000 and 2016 in PubMed, Web of Science, and Sport-Discus, as well as in the references cited in retrieved articles. The publication language was Spanish or English, and a total of 9 items were recovered and analysed.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: calebaraguas@hotmail.com (C. Araguas Garcia).

Most studies suggest that foot sensory feedback is essential in maintaining the general (postural and displacement) and specific (sports) patterns. Altering the quantity or quality of the plantar afferent information, not only appears to alter the creation of different patterns, but may increase the risk of injury.

© 2016 Consell Català de l'Esport. Generalitat de Catalunya. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Introducción

El pie es una estructura hipercompleja sobre la que se sustenta nuestro cuerpo y que se caracteriza por ser la única parte que contacta con el suelo. Entre sus diversas funciones, destaca la de proporcionar información aferente al sistema nervioso central desde los receptores plantares, que será utilizada posteriormente para mantener la postura y generar patrones de movimiento. En los últimos años, diversas líneas de investigación se han centrado en el estudio de la influencia que la información aferente proporcionada por los receptores plantares del sistema somatosensorial ejerce sobre el equilibrio, el control postural y el movimiento, así como en la aparición de lesiones¹⁻⁴. Teniendo en cuenta que la planta del pie es el límite entre nuestro cuerpo y la superficie sobre la que este se sustenta y que además, está dotada de gran cantidad de receptores sensitivos, resulta lógico pensar que esta tendrá una implicación directa en la gestión de la postura y del movimiento^{5,6}.

La piel es el mayor órgano del cuerpo humano⁷, cuya función es la de actuar como barrera protectora, aislando al organismo del medio que lo rodea, protegiéndolo y contribuyendo a mantener íntegras sus estructuras, al tiempo que actúa como un sistema de comunicación altamente eficiente entre nuestro cuerpo y el entorno más próximo. Además, la piel del pie posee ciertas características que la diferencian de la del resto del cuerpo humano: en primer lugar, su epidermis presenta un mayor espesor, lo que contribuye a mejorar su resistencia y su capacidad de amortiguar cargas. En segundo lugar, la piel del pie no posee glándulas sebáceas, de manera que la película hidrolipídica es menos rica en componentes grasos. Y por último, presenta un elevado número de glándulas sudoríparas eccrinas, a través de las que se elimina agua, sales minerales y sustancias de desecho⁸.

El grupo de receptores plantares que posibilitan la sensibilidad en el pie es heterogéneo debido a la diferente naturaleza de los distintos tipos de receptores cutáneos y a la diversidad de fibras nerviosas aferentes existentes⁹. A excepción de los nociceptores y de los termorreceptores, la mayoría de las aferencias cutáneas corresponden a los mecanorreceptores, que responden a estímulos de presión y vibración, y se encuentran relacionados con las fibras aferentes mielínicas (fibras de velocidad de conducción rápidas)¹⁰.

Los mecanorreceptores pueden ser clasificados en dos grupos: los de adaptación rápida y los de adaptación lenta. Dentro del primer grupo, encontramos los corpúsculos de Meissner y los de Paccini¹¹. A los primeros también se les

denomina táctiles, y son de localización superficial (interviniendo en el tacto superficial y respondiendo a vibraciones de baja frecuencia)^{12,13}. Por su parte, los corpúsculos de Paccini se encuentran en la dermis profunda de la piel y en el interior del tejido adiposo plantar y responden de forma rápida a sensaciones de presión profunda, vibración de alta frecuencia y estiramiento¹⁴.

Asimismo, podemos encontrar dos tipos de mecanorreceptores de adaptación lenta: los discos de Merkel y los corpúsculos de Ruffini¹⁵. El disco de Merkel se localiza en la superficie de la epidermis de la piel y está implicado en el tacto superficial o discriminativo. A los corpúsculos de Ruffini, se les considera una variante de los corpúsculos de Meissner, se localizan más profundamente y median sensaciones de tacto grueso y persistente¹⁶.

Además, los niveles de sensibilidad en la superficie plantar podrán variar enormemente dentro de la población sana¹⁷ y patológica¹⁸, observándose umbrales de activación muy distintos en función de la edad, la zona del pie, el sexo o el tipo de estímulo presentado (vibratorio o de presión)¹⁹. Todo ello sugiere que la información aferente plantar podría influir directamente sobre la capacidad de reequilibración y sobre la creación de patrones motores.

Por ello, el objetivo principal de este estudio es analizar la influencia de la sensibilidad plantar en la modificación de la capacidad de reequilibración y de gestión del movimiento, analizando los mecanismos que permiten valorarla y describiendo los factores que en ella influyen.

Metodología

Los diferentes artículos analizados en este trabajo fueron localizados en las bases de datos informatizadas on-line PubMed (MEDLINE), Web of Science y Sport-Discus. Las palabras clave utilizadas para la búsqueda fueron: <sport injury>, <sensitivity>, <skin>, <foot> y <posture>. Los términos de búsqueda se utilizaron inicialmente en forma independiente, y fueron posteriormente agrupados empleando los términos AND y OR. Respecto a los criterios de selección, se incluyeron estudios experimentales y cuasiexperimentales en inglés y publicados en revistas de impacto. La búsqueda de artículos se limitó de enero de 2000 a enero de 2016. Además, en cuanto a los restantes criterios de inclusión se siguió el referente PICR (Participantes/Intervención/Comparación/Resultados). La organización de los artículos incluidos se realizó con el software de gestión de publicaciones «Mendeley». Una vez

analizados los diferentes estudios obtenidos se descartaron aquellos duplicados, con escaso rigor metodológico, estudios de casos o cuya temática no se ajustaba exactamente a los objetivos del estudio y aquellos cuyo texto finalmente no se pudo conseguir.

Resultados

La estrategia de búsqueda y selección de artículos empleada en esta revisión obtuvo un total de 9 artículos, que finalmente cumplieron con los criterios de inclusión. Las características de los diferentes estudios localizados pueden ser consultadas en la [tabla 1](#).

Diversas metodologías han sido utilizadas para la valoración de la sensibilidad plantar: táctil²⁹, algésica³⁰, térmica³¹, vibratoria³², barestésica³³, propiocepción³⁴, reflejos³⁵ ([tabla 2](#)). En general, en estas metodologías suelen aplicarse estímulos mecánicos de diferente intensidad en puntos simétricos de ambos hemisferios corporales o comparar el nivel de sensibilidad entre áreas corporales distintas³⁶. Para ello, parece importante que las valoraciones sean realizadas en ausencia de fatiga, ya que se ha evidenciado que la existencia de fatiga parece influir negativamente en su valoración³⁷. Aunque gran parte de estas metodologías provienen del ámbito clínico³⁸, muchas pueden ser aplicadas de forma directa o con ligeras modificaciones en sujetos sanos y deportistas³⁹.

Factores externos influyentes en la sensibilidad plantar

La temperatura

Diversos estudios han sugerido que la aplicación local de frío parece incrementar de forma aguda la actividad nerviosa simpática en la zona aplicada⁴⁰, generar una vasoconstricción local refleja⁴¹, disminuir la temperatura cutánea⁴² y alterar la sensibilidad local⁴³. En este sentido, Nurse y Nigg⁶ constataron que el centro de presión se desplazaba, desde las zonas donde se había aplicado frío hacia las zonas donde la sensibilidad era mayor, registrándose además, variaciones en los patrones de actividad muscular. Por su parte, Eils et al.⁴⁴, siguiendo una metodología similar, constataron reducciones en los picos de presión plantar de las zonas estimuladas y una alteración en los patrones de presión plantar. Este hecho, puede ser interpretado como una forma de protección corporal, en la que se buscaría evitar el contacto en aquellas zonas del pie, cuya sensibilidad se presente alterada, buscando un apoyo que solicite aquellas zonas con mayor sensibilidad.

Calzado

Diversos autores han teorizado sobre la influencia que el calzado deportivo podía tener en la alteración de la sensibilidad plantar, en la información proporcionada por vía aferente desde los receptores plantares⁴⁵ y en la disminución de su umbral de estimulación⁴⁶. Factores como la dureza, el diseño o el grosor de la suela del calzado⁴⁷, el tipo de calzado⁴⁸, el tipo de plantilla interior⁴⁹ el uso de

determinado calzado específico como son las botas de fútbol⁵⁰, parecen influir directamente sobre el nivel de sensibilidad plantar. Además, se ha mostrado que la utilización de calzado con cámara de aire podría incrementar el nivel de inestabilidad en el pie y aumentar el riesgo de lesión, fruto de la disminución de información aferente⁵¹ y que determinado calzado, como el calzado minimalista, también podría tener repercusión sobre los niveles de sensibilidad plantar⁵², especialmente cuando provoca estímulos dolorosos⁵³. En este sentido, queda claro que el tipo y las características del calzado utilizado podrían generar modificaciones en la cantidad y calidad de la información recogida⁵⁴.

Tipo de superficie de contacto

La dureza del terreno o del calzado son factores que pueden modificar la sensibilidad plantar e influir en el patrón de movimiento⁵⁵. Chiang y Wu⁵⁶ observaron cómo a medida que la dureza del suelo se volvía más blanda la estabilidad corporal disminuía, los tiempos de respuesta aferente aumentaban y las presiones plantares registradas se modificaban, fruto todo ello de la alteración de los receptores cutáneos y no de los musculares⁵⁷.

Hiperqueratosis

Las hiperqueratosis aparecen cuando se produce un engrosamiento de la capa córnea de la epidermis originada por la hipertrofia (aumento del tamaño de sus células) o hiperplasia (aumento del número de sus células). Este incremento en el tamaño o número de las células afecta fundamentalmente a los queratinocitos o corneocitos, que son las células más numerosas de la capa más externa de la epidermis⁵⁸. Las hiperqueratosis plantares son capaces de inhibir la retroalimentación sensorial en la zona donde se desarrollan⁵⁹, lo que provocará un desplazamiento del centro de presiones desde las áreas con menor sensibilidad hacia las de mayor⁶⁰.

Vibraciones mecánicas

Aunque la gran mayoría de los estudios sobre la percepción vibrotáctil de la piel han sido realizados en la mano, existe un alto grado de consenso sobre la influencia que las vibraciones mecánicas tienen en el pie, especialmente en determinadas patologías como el pie diabético. Este hecho se debe a la gran cantidad de mecanorreceptores presentes en la planta del pie (Kennedy e Inglis⁶¹ localizaron 104 mecanorreceptores en la piel del pie humano), y a la existencia de umbrales específicos de vibración en función de la zona del pie (se han encontrado umbrales vibrotáctiles más bajos en la planta del mediopié que en el talón o los dedos del pie¹⁷). Todo ello condicionará a la existencia de respuestas eferentes específicas en función del tipo de estímulo vibratorio presentado. En este sentido, la utilización de vibraciones mecánicas como método de entrenamiento se ha constatado que puede alterar el nivel de sensibilidad plantar y afectar a la capacidad de reequilibración⁶², especialmente en los 10 min posteriores a su aplicación y cuando las vibraciones mecánicas son de alta frecuencia⁶³.

Tabla 1 Características de los estudios realizados sobre la alteración de la sensibilidad plantar en el pie

Autor (año)	Número muestra	Edad (años)	Objetivo	Instrumento valoración	Mecanismo alteración sensibilidad	Zona valorada	Resultados
Kavounoudias y Roll (1998) ²⁰	10	No especificado	Estudiar el efecto que la aplicación de vibraciones en la planta del pie tiene en el equilibrio corporal	Oscilómetros	Vibración	Pie	El estímulo provocaba una inclinación corporal oblicua e involuntaria, siempre en dirección contraria a la zona del pie donde se aplicaba la vibración
Nurse y Nigg. (1999) ²¹	15	No especificado	Analizar la relación existente entre la sensibilidad (a la presión y a la vibración) y las presiones registradas en la planta del pie durante la marcha	Monofilamentos de Semmes-Weinstein, oscilómetro	Presión vibración	Hallux	Existe una correlación inversa entre el umbral de vibración del hallux a frecuencias altas y el pico máximo de presión plantar detectado en el hallux durante la marcha y la carrera. Sujetos con mayor sensibilidad en el hallux presentaban mayores picos de presión plantar en la carrera
Bensmaïa et al. (2005) ²²	22	No especificado	Investigar los efectos sobre la sensibilidad de la estimulación vibratoria supraumbral	Motor lineal de realimentación controlada	Vibración	Pie	La aplicación de estímulos vibratorios por encima del umbral de excitación, puede alterar la capacidad de activación de los mecanorreceptores aferentes
Eils et al. (2002) ²³	40	25,3 ± 3,3	Determinar la influencia de la reducción de la sensibilidad plantar, a través de la reducción de la temperatura del pie, en la distribución de los patrones de presión plantar durante la marcha	Monofilamentos de Semmes-Weinstein	Presión	Planta pie	La reducción de la temperatura cutánea modifica los patrones de la distribución de la presión de la planta del pie a lo largo de su apoyo
Wang y Lin. (2007) ²⁴	21	No especificado	Investigar la correlación entre el grado de pérdida somatosensorial de la planta del pie y el grado de estabilidad postural	No especificado	Táctil	Planta del pie	La isquemia está asociada al incremento de la pérdida de sensibilidad plantar cutánea y a un incremento de la inestabilidad postural

Tabla 1 (continuación)

Autor (año)	Número muestra	Edad (años)	Objetivo	Instrumento valoración	Mecanismo alteración sensibilidad	Zona valorada	Resultados
Meyer et al. (2004) ²⁵	6	26 ± 10	Asociar la influencia de la anestesia local subcutánea inyectada en la sensación plantar cutánea y el equilibrio corporal	No especificado	Táctil	Planta del pie	La anestesia local está asociada al incremento de la pérdida de sensibilidad plantar cutánea y a un incremento de la inestabilidad postural, principalmente cuando no se dispone de la información proporcionada por la vista
Burcal et al. (2016) ²⁶	45	20,2 ± 2,8	Determinar si existen diferencias en la sensación plantar entre los corredores que han sufrido lesiones en tobillo y los que no	Instrumento eléctrico de umbral sensorial	Vibración	Arco plantar	Los corredores con antecedentes de lesión mostraron un aumento del umbral vibratorio en la región de arco en comparación con los corredores no lesionados. Una mayor sensibilidad plantar altera las funciones sensoriales después de la lesión. Este factor puede influir en el control postural subyacente y contribuir a las respuestas de carga alteradas en los corredores lesionados
Vie et al. (2014) ²⁷	30	28,7 ± 8,6	Analizar si la sensación plantar somatosensorial podría modificarse mediante el uso de almohadillas metatarsales duras	Stevens Power Function	Presión	Antepié	Las almohadillas metatarsianas con dureza relativamente alta aumentaron la percepción del estímulo mecánico en antepié en comparación con almohadillas metatarsianas suaves
Lipsitz et al. (2014) ²⁸	12	62,3 ± 4,5	Establecer si el ruido vibratorio subsensorial aplicado a la planta del pie mediante una plantilla vibratoria piezoeléctrica puede mejorar la sensibilidad y mejorar el equilibrio	Plantilla de espuma de uretano con sensor piezoeléctrico	Vibración	Planta pie	La aplicación del principio de la resonancia estocástica para el sistema sensorial del pie, utilizando una nueva tecnología piezoeléctrica de baja tensión puede mejorar las medidas del equilibrio y de la marcha

Tabla 2 Metodologías para la valoración de la sensibilidad plantar

Autor y año	Denominación	Instrumento a utilizar	Protocolo	Signos de alerta
Pedro et al. (2011) ²⁹	Sensibilidad táctil epicrítica	Pincel, algodón	Sujeto tumbado en una camilla exploratoria y con privación de la visión. Mediante un pincel o un algodón, se aplicarán diferentes pasadas en distintas zonas de los pies, teniendo el sujeto que identificar cuándo este es tocado	El sujeto no es capaz de reconocer la sensación en diferentes puntos del pie
Runkle et al. (2006) ³⁰	Sensibilidad algésica	Alfiler punta roma	Sujeto tumbado en una camilla exploratoria y con privación de la visión. Mediante un alfiler con punta roma se presiona distintas zonas del pie y se pregunta al paciente si siente dolor	Si el sujeto no detecta la estimulación en más de un punto en cada pie
Cacicedo et al. (2011) ³¹	Sensibilidad térmica	Barra térmica	Aplicar la barra térmica sobre diferentes áreas del pie, evitando siempre las zonas de hiperqueratosis o lesionadas	Cuando la temperatura aplicada sobre el pie del sujeto sea superior a 40° C o inferior a 25° C y este sea incapaz de identificarlo
Fernández et al. (2009) ³²	Sensibilidad vibratoria	Diapasón graduado de Rydel Seiffer (128 Hz)	Con el sujeto situado en decúbito supino en una camilla de exploración, se hará vibrar un diapasón y se colocará en la punta del primer dedo del pie, en la cabeza del primer metatarsiano y se desplazará en dirección a los maléolos tibiales y peroneales	En el momento en el que el sujeto indique que deja de sentir la vibración, se anotará la medida que aparece en el punto de intersección de ambos triángulos
Gutiérrez et al. (2005) ³³	Sensibilidad barestésica o presora	Monofilamento 5.07 de Semmens-Weinstein	Colocación del sujeto en posición de decúbito supino en una camilla de exploración. El sanitario presionará perpendicularmente con el monofilamento sobre la piel y sin que se deslice sobre ella. El hilo se debe doblar durante un tiempo de 1 a 1,5 segundos	Cuando el paciente no es capaz de sentir uno de los puntos donde el monofilamento se dobla significa que la sensación táctil ha disminuido por debajo del umbral de protección sensitivo
Sullivan et al. (2001) ³⁴	Propiocepción	-	Se colocará una articulación o extremidad en una posición determinada y se instará al participante a que reproduzca la misma posición en la extremidad contralateral	No ser capaz de reproducir la posición con la extremidad contralateral
Singh et al. (2005) ³⁵	Reflejo aquileo	Martillo neuropercutor	Aplicación de un pequeño golpe con el martillo neuropercutor en el tendón de Aquiles para provocar una respuesta flexora plantar del pie	La ausencia de respuesta refleja indica que el paciente padece una afectación neuropática

Plantillas propioceptivas

Recientemente se ha sugerido que la colocación en el interior del calzado de plantillas de distintas texturas parece mejorar el control postural⁶⁴, incrementando la capacidad

de discriminación posicional del tobillo, previniendo la aparición de lesiones⁶⁵ y creando patrones musculares más eficientes⁶⁶. Además, estas mejoras parecen aparecer en relativamente poco tiempo (5 semanas)⁶⁴. Santos et al.⁶⁷, constataron que la utilización de botas de fútbol disminuía la

sensibilidad plantar debido a una reducción de la superficie de contacto pie-suelo y a un aumento de los picos de presión plantar y que cuando se utilizaron botas de fútbol de forma combinada con plantillas estimuladoras, la sensibilidad y la respuesta propioceptiva mejoraba considerablemente.

Discusión

Tradicionalmente, el pie ha sido considerado como un eslabón fundamental dentro del mantenimiento del equilibrio postural⁶⁸. Los primeros modelos que trataron de explicar cómo se reequilibraba el ser humano presentaban al cuerpo como un péndulo invertido⁶⁹, cuyo eje de rotación se situaba en el tobillo y en el que las oscilaciones constantes del centro de gravedad eran reajustadas, gracias a la información proporcionada a través de las vías aferentes⁷⁰. Aunque posteriormente fueron presentados otros modelos explicativos que atribuían a la cadera un papel fundamental dentro del proceso de reequilibración⁷¹, en la actualidad existe un cierto consenso sobre la existencia de un modelo combinado e intermitente en el que interaccionan de forma específica las diferentes partes corporales implicadas en una postura o movimiento⁷² y que será configurado, en gran parte, a partir de la información proporcionada por el sistema somatosensorial⁷³.

En este sentido, parece que la información proporcionada por los receptores plantares resulta fundamental, ya que parece que cualquier alteración en la sensibilidad de los receptores cutáneos de la planta del pie, podría tener implicaciones directas en la alteración de los patrones cinéticos y musculares de apoyo⁷⁴. Así por ejemplo, diversos estudios han observado cómo en sujetos sometidos a ingravidez, la pérdida de información aferente proporcionada por la planta del pie podría provocar una disminución en la actividad de la musculatura tónica⁷⁵. Kozlovskaya et al.⁷⁶ constataron cómo al sumergir a un grupo de sujetos en el interior de un tanque con agua durante un período de tiempo prolongado, se producía una disminución en los niveles de activación de la musculatura tónica postural extensora⁷⁷ y un aumento en los de la flexora⁷⁸, como consecuencia de la eliminación de la información aferente proporcionada por la planta del pie. Aunque gran parte de estas modificaciones van a producirse localmente, todo ello sugiere que también podrían generarse modificaciones a nivel cerebral⁷⁹. Así por ejemplo, Liepert et al. (1995) constataron cómo después de una inmovilización del pie de entre cuatro y seis semanas como consecuencia de una fractura, se producía un decremento en la representación cortical en el área del pie en el cerebro⁸⁰.

De forma similar, parece que una disminución en los niveles de retroalimentación sensorial en áreas selectivas del pie durante la marcha podría provocar un desplazamiento del centro de presiones plantar, desde las zonas donde se ha producido una pérdida de sensibilidad, hacia áreas de la planta del pie con mayor sensibilidad⁸¹, lo que podrá generar cambios en los patrones de presión plantar (pico de presión e integral presión-tiempo). Además, parece que todo ello podría tener repercusiones sobre los músculos implicados en el movimiento y su nivel de actividad⁸².

Por el contrario, diversos estudios sugieren que determinadas actividades podrían favorecer la capacidad local de recogida de información aferente o la capacidad central de

activación de áreas cerebrales concretas, generando adaptaciones específicas fruto del entrenamiento. Meier et al.⁷⁹ constataron, al comparar jugadores profesionales de balonmano con bailarinas profesionales, cómo estas últimas eran capaces de optimizar el nivel de activación de zonas cerebrales específicas relacionadas con el control segmentario del pie. Este hecho podría deberse, al menos en parte, al desarrollo de una mayor capacidad sensitiva desarrollada en las bailarinas por el hecho de trabajar descalzas, adoptar diferentes posiciones sobre el pie en situaciones de inestabilidad y estimular áreas de contacto muy reducidas. De forma similar, también se han constatado mejoras en los niveles de activación cerebral en deportistas que utilizan los pies de forma específica en sus deportes. En un estudio en el que se comparaba al jugador de fútbol Neymar Jr. con otros jugadores de fútbol (tres profesionales y un amateur) y con dos nadadores profesionales, se observó como este presentaba una menor actividad neural en la zona de su cerebro relacionada con el pie, al realizar movimientos simples con él, lo que fue interpretado como un signo de eficiencia⁸³. Además, estos resultados van en la línea de los obtenidos en otras regiones corporales como las manos, en grupos que habitualmente deben desarrollar altas prestaciones como es el caso de los pianistas o teclistas⁸⁴ y se ha observado cómo también sucede en primates no humanos⁸⁵.

Todo ello sugiere que, cualquier alteración de la información proporcionada de forma aferente desde los pies, podría modificar los patrones de activación muscular durante la bipedestación⁴¹, influyendo de forma directa sobre los niveles de estabilidad postural.

Por otro lado, diversos estudios han mostrado la existencia de una relación directa entre una disminución en la sensibilidad plantar y un mayor riesgo lesional. Así por ejemplo, se ha constatado cómo aquellos deportistas que han sufrido lesiones de tobillo presentan menores niveles de estabilidad postural⁸⁶, una disminución en los niveles de estabilidad articular y unos patrones motores alterados⁸⁷. De forma similar, Steinberg et al.⁸⁸ observaron cómo en pacientes con lesión del ligamento cruzado anterior existía una peor sensibilidad vibratoria en el pie y en el tobillo.

Estas alteraciones parecen ser fruto de la aparición de una modificación en la funcionalidad de los canales de información aferente provocada por la lesión, lo que justifica la necesidad de reeducar y optimizar su funcionalidad. Por otro lado, se ha cuestionado la posible influencia negativa que la crioterapia (como tratamiento o método de recuperación) podría tener sobre la capacidad de propiocepción, constatándose que los efectos sobre la capacidad propioceptiva podrán ser variables en función del tiempo de aplicación⁸⁹ y de la zona corporal analizada⁹⁰.

Diversos autores han investigado el efecto que el entrenamiento propioceptivo del tobillo genera en el equilibrio corporal estático, constatando que en individuos sanos, este genera efectos positivos⁹¹. Han et al.⁹² midieron la capacidad propioceptiva del tobillo, en 100 deportistas de élite de 5 deportes distintos (gimnasia, fútbol, natación, bádminton y baile), observando una relación directa entre el nivel de propiocepción del tobillo y el rendimiento deportivo, incluso a nivel olímpico. Todo ello, parece indicar cómo la obtención de mejoras en el equilibrio corporal a través de la sensibilidad plantar, permite disminuir el nivel de atención que el deportista tiene que dedicar, consciente

o inconscientemente, al mantenimiento de la estabilidad corporal, pudiendo dedicar esta a la mejora del gesto deportivo. En un estudio en el que se compararon gimnastas con deportistas que no trabajaban de forma específica la propiocepción, se observó que los primeros disminuían su dependencia sobre los procesos de control postural, cuando eran sometidos a tareas distintas o de mayor complejidad⁹³. Por todo ello, parece lógico pensar que un entrenamiento específico de los receptores plantares podría tener efectos positivos en la creación y optimización de los patrones motores. Por ello, su mejora debería ser considerada, tanto en actividades deportivas como en programas preventivos y de tratamiento de lesiones.

Conclusiones y recomendaciones

Según sugiere nuestra revisión, la retroalimentación sensorial del pie resulta fundamental en el mantenimiento de los patrones generales (posturales y de desplazamiento) y específicos (deportivos). Una alteración en la cantidad o calidad de la información aferente plantar no solo podrá alterar la creación de los diferentes patrones, sino que podrá incrementar el riesgo de aparición de lesiones. En este sentido, resultará básico el mantenimiento y la optimización de la capacidad de recogida de información aferente de los distintos sistemas, como forma de evitar la aparición de lesiones y patologías y de mejorar el rendimiento. La monitorización continua de los niveles de recogida de información, unido a la creación de tareas de estimulación son alternativas que deberían ser consideradas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. Billot M, Handrigan GA, Simoneau M, Teasdale N. Reduced plantar sole sensitivity induces balance control modifications to compensate ankle tendon vibration and vision deprivation. *J Electromyogr Kinesiol*. 2015;25:150–60.
2. Powell MR, Powden CJ, Houston MN, Hoch MC. Plantar cutaneous sensitivity and balance in individuals with and without chronic ankle instability. *Clin J Sport Med*. 2014;24:490–6.
3. Fort A, Romero D. Rol del sistema sensoriomotor en la estabilidad articular durante las actividades deportivas. *Apunts Med Esport*. 2013;48:69–71.
4. Robbins SE, Hanna AM, Govw G. Overload protection avoidance response to heavy plantar surface loading. *Med Sci Sports Exerc*. 1988;20:85–92.
5. Corbi F. Análisis de las presiones plantares y su relación con la velocidad de la pelota durante el goleo paralelo de derecha en tenis [tesis doctoral]. Barcelona: Universidad de Barcelona; 2008.
6. Nurse MA, Nigg BM. The effect of changes in foot sensation on plantar pressure and muscle activity *Clinical biomechanics*. Bristol. 2001;16:719–27.
7. Freedberg A, Fitzpatrick's I. *Dermatology In General Medicine*. 5.^a ed New York: Mcgraw-Hill; 1999.
8. Fustero I. Cuidado de los pies. *Offarm*. 2007;2:66–72.
9. Dupui PH, Costes-Salon MC, Montoya R, Séverac A, Lazerges M, Pagés B, et al. Interet de l'analyse fréquentielle des oscillations posturales lors de l'équilibre dynamique. *Société d'études et de*

- recherches multi-disciplinaires sur la locomotion. Paris: Collège de France. 1990.
10. Dupui PH, Montoya R. *Approche physiologique des analyses posturographiques statiques et dynamiques*. Physiologie, Techniques, Pathologies. 3.^a ed. Paris: Posture et Equilibre; 2003.
 11. Vega JA, García-Suárez O, Montaña JA, Pardo B, Cobo JM, The Meissner. Pacinian sensory corpuscles revisited new data from the last decade. *Microsc Res Tech*. 2009;72:299–309.
 12. Hoffmann JN, Montag AG, Dominy NJ. Meissner corpuscles and somatosensory acuity: the prehensile appendages of primates and elephants. *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol*. 2004;281:1138–47.
 13. Luo W, Enomoto H, Rice FL, Milbrandt J, Ginty DD. Molecular identification of rapidly adapting mechanoreceptors and their developmental dependence on ret signaling. *Neuron*. 2009;64:841–56.
 14. Rein S, Manthey S, Zwipp H, Witt A. Distribution of sensory nerve endings around the human sinus tarsi: a cadaver study. *J Anat*. 2014;224:499–508.
 15. Maeda T, Ochi K, Nakakura-Ohshima K, Youn SH, Wakisaka S. The Ruffini ending as the primary mechanoreceptor in the periodontal ligament: its morphology, cytochemical features, regeneration, and development. *Crit Rev Oral Biol Med*. 1999;10:307–27.
 16. Thibodeau GA, Patton KT. *Anatomía y fisiología*. 6.^a ed Madrid: Elsevier; 2007.
 17. Kekoni J, Hämmäläinen H, Rautio J, Tukeya T. Mechanical sensibility of the sole of the foot determined with vibratory of varying frequency. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Exp Brain Res*. 1989;78:419–24.
 18. Rautio J, Kekoni J, Hämmäläinen H, Härmä A. Mechanical sensibility in free and island flaps of the foot. *J Reconstr Microsurg*. 1989;5:119–25.
 19. Hennig EM, Sterzing T. Sensitivity mapping of the human foot: thresholds at 30 skin locations. *Foot ankle Int*. 2009;30:986–91.
 20. Kavounoudias A, Roll R, Roll JP. The plantar sole is a 'dynamometric map' for human balance control. *NeuroReport*. 1998;9:3247–52.
 21. Nurse MA, Nigg BM. Quantifying a relation ship between tactile and vibration sensitivity of human foot with plantar pressure distributions during gait. *Clinical Biomechanics*. 1999;14:667–72.
 22. Bensmaïa SJ, Leung YY, Hsiao SS, Johnson KO. Vibratory adaptation of cutaneous mechanoreceptive afferent. *J Neurophysiol*. 2005;94:3023–36.
 23. Eils E, Nolte S, Tewes M, Thorwesten L, Olker KV, Rosenbaum D. Modified pressure distribution patterns in walking following reduction of plantar sensation. *J Biomech*. 2002;35:1307–13.
 24. Wang TY, Lin S. Sensitivity of plantar cutaneous sensation and postural stability. *Clin Biomech*. 2008;23:493–9.
 25. Meyer F, Oddsson IE, de Luca J. Reduced plantar sensitivity alters postural responses to lateral perturbations of balance. *Exp Brain Res*. 2004;157:526–36.
 26. Burcal CJ, Wikstrom EA. Plantar cutaneous sensitivity with and without cognitive loading in people with chronic ankle instability, copers, and uninjured controls. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2016;1–24.
 27. Vie B, Loffredo R, Sanahdjji F, Weber JP, Jammes Y. Consequences of repetitive toenail cutting by podiatric physicians on force production, endurance to fatigue, and the electromyogram of the flexor digitorum superficialis muscles. *J Am Podiatr Med Assoc*. 2014;104:486–92.
 28. Lipsitz LA, Lough M, Niemi J, Trivison T, Howlett H, Manor B. A shoe insole delivering subsensory vibratory noise improves balance and gait in healthy elderly people. *Arch Phys Med Rehabil*. 2015;96:432–9.
 29. Pedro J, Rivera AM, Oliván RM. Manejo del pie diabético. *Guía de enfermería*. 2011;79:29–41.

30. Runkle I, Díaz J, Durán A, Romero L. Técnicas de exploración de la sensibilidad en la patología del pie. *Av Diabetol*. 2006;22:42–9.
31. Cacicedo R, Castañeda C, Cosío F, Delgado A, Fernández B, Gómez M, et al. Manual de prevención y cuidados locales de heridas crónicas. 1.ª ed Cantabria: Servicio Cántabro de Salud; 2011.
32. Fernández T, Montequín F. Manual para la prevención, diagnóstico y tratamiento del pie diabético. *Rev Cuba Angiol Cirug Vasc*. 2009;10:42–96.
33. Gutiérrez T, Reyes R, Pizarro C. Pié diabético, una visión fisiátrica. *Rev Hosp Clin Univ Chile*. 2005;16:14–23.
34. O'Sullivan S. Assessment of motor function. 1.ª ed. Philadelphia: Physical Rehabilitation; 2005.
35. Singh N, Armstrong D, Lipsky B. Preventing foot ulcers in patients with diabetes. *JAMA*. 2005;293:217–28.
36. Bates B, Bickley LS, Hoekelman RA. A guide to physical examination and history taking. 6.º ed Philadelphia: JB Lippincott; 1995.
37. Sweeny VP. History and physical examination in patients with neurologic complaints. En: Kelley WN, De Vita VT, editores. *Textbook of internal medicine*. 2.º ed. Philadelphia: JB Lippincott; 1992. p. 2251–5.
38. Murray J. Neurologic history and examination. En: Stein JH, editor. *Internal medicine*. 4.º ed. St Louis: Mosby-Year Book; 1994. p. 960–1.
39. Martin JB, Hauser SL. Estudio del paciente con una enfermedad neurológica. En: Braunwald E, editor. *Harrison, principios de medicina interna*. 15.ª ed. México DF: McGraw-Hill Interamericana; 2002. p. 2219–25.
40. Ishida K, Nakamura T, Kimura K, Kanno N, Takahashi N, Kamijo Y-I, et al. Suppression of activation of muscle sympathetic nerve during non-noxious local cooling after the end of local cooling in normal adults. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116:851–8.
41. Diener J, Dichgans B, Guschlbauer H. The significance of proprioception on postural stabilization as assessed by ischemia. *Brain Res*. 1984;296:103–9.
42. Zaproudina N, Lipponen JA, Eskelinen P, Tarvainen MP, Karjalainen PA, Närhi M. Measurements of skin temperature responses to cold exposure of foot and face in healthy individuals: variability and influencing factors. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2011;31:307–14.
43. Eglin CM, Golden FS, Tipton MJ. Cold sensitivity test for individuals with non-freezing cold injury: the effect of prior exercise. *Extrem Physiol Med*. 2013;2:16.
44. Eils E, Nolte S, Tewes M, Thorwesten L, Olker KV, Rosenbaum D. Modified pressure distribution patterns in walking following reduction of plantar sensation. *Journal of Biomechanics*. 2002;35:1307–13.
45. Robbins SE, Hanna AM. Running-related injury prevention through barefoot adaptations. *Med Sci Sports Exerc*. 1987;19:148–52.
46. Robbins SE, Hanna AM, Jones L. Sensory attenuation induced by modern athletic footwear. *J Test Eval*. 1988;16:422–6.
47. Losa ME, Becerro R, Palacios D. Impact of soft and hard insole density on postural stability in older adults geriatr nurs. 2012;33:264–71.
48. Schlee G, Sterzing T, Milani TL. Effects of footwear on plantar foot sensitivity: a study with Formula 1 shoes. *Eur J Appl Physiol*. 2009;106:305–9.
49. Qu X. Impacts of different types of insoles on postural stability in older adults. *Appl Ergon*. 2015;46 Pt A:38–43.
50. Waddington G, Adams R. Football boot insoles and sensitivity to extent of ankle inversion movement. *Br J Sports Med*. 2003;37:170–5.
51. Serrano MA. Analysis of the instability of the foot with sport footwear or air chamber, during statics. *Rev Int Pod*. 2007;1:7–15.
52. Trombini-Souza F, Matias AB, Yokota M, Butugan MK, Goldenstein-Schainberg C, Fuller R, et al. Long-term use of minimal footwear on pain, self-reported function, analgesic intake, and joint loading in elderly women with knee osteoarthritis: A randomized controlled trial. *Clin Biomech*. 2015;30:1194–201.
53. Ryan M, Elashi M, Newsham-West R, Taunton J. Examining injury risk and pain perception in runners using minimalist footwear. *Br J Sports Med*. 2014;48:1257–62.
54. Khoury M, Wolf A, Debbi EM, Herman A, Haim A. Foot center of pressure trajectory alteration by biomechanical manipulation of shoe design. *Foot ankle*. 2013;34:593–8.
55. Chambon N, Delattre N, Guéguen N, Berton E, Rao G. Is midsole thickness a key parameter for the running pattern? *Gait Posture*. 2014;40:58–63.
56. Chiang J, Wu G. The effects of surface compliance on foot pressure in stance. *Gait and Posture*. 1996;4:122–9.
57. Chiang J, Wu G. The influence of foam surfaces on biomechanical variables contributing to postural control. *Gait and Posture*. 1997;5:239–45.
58. Rubin L. Hyperkeratosis in response to mechanical irritation. *J Invest Dermatol*. 1949;13:313–5.
59. Balanowski KR, Flynn LM. Effect of painful keratoses debridement on foot pain, balance and function in older adults. *Gait Posture*. 2005;22:302–7.
60. Kavounoudias A, Roll R, Roll J. The plantar sole is a dynamometric map for human balance control. *Neuroreport*. 1998;8:3247–52.
61. Kennedy PM, Inglis JT. Interaction effects of galvanic vestibular stimulation and head position on the soleus H reflex in humans. *Clin Neurophysiol*. 2002;113:1709–14.
62. Sonza A, Maurer C, Achaval M, Zaro MA, Nigg BM. Human cutaneous sensors on the sole of the foot: altered sensitivity and recovery time after whole body vibration. *Neurosci Lett*. 2013;533:81–5.
63. Sonza A, Robinson CC, Achaval M, Zaro MA. Whole body vibration at different exposure frequencies: infrared thermography and physiological effects. *ScientificWorldJournal*. 2015;2015:452657.
64. Steinberg N, Waddington G, Adams R, Karin J, Begg R, Tirosh O. Can textured insoles improve ankle proprioception and performance in dancers? *J Sports Sci*. 2015;30:1–8.
65. Steinberg N, Waddington G, Adams R, Karin J, Tirosh O. The effect of textured ballet shoe insoles on ankle proprioception in dancers. *Phys Ther Sport*. 2016;17:38–44.
66. Kelleher KJ, Spence WD, Solomonidis S, Apatsidis D. The effect of textured insoles on gait patterns of people with multiple sclerosis. *Gait Posture*. 2010;32:67–71.
67. Santos D, Carline T, Flynn L, Pitman D, Feeney D, Patterson C, et al. Distribution of in-shoe dynamic plantar foot pressures in professional football players. *Foot*. 2001;11:10–4.
68. Watanabe I, Okubo LJ. The role of plantar mechanoreceptor in the equilibrium control. En: Colen B, editor. *Vestibular and oculomotor physiology: international meeting of the Baray society*. New York: Annals of the New York academy of sciences; 1981. pp. 855–864.
69. Kuo AD. The six determinants of gait and the inverted pendulum analogy: A dynamic walking perspective. *Human Movement Science*. 2007;26:617–56.
70. Roberts A, Stenhouse E. The nature of postural sway. *Agressologie*. 1976;17A:11–4.
71. Horak FB, Nashner LM. Central programming of postural movements: adaptation to altered support surface configurations. *J Neurophysiol*. 1986;55:1369–81.
72. Kilby MC, Molenaar PCM, Newell KM. Models of postural control: shared variance in joint and COM motions. *PLoS One*. 2015;10:e0126379.

73. Manchester D, Woollacott M, Zederbauer-Hylton N, Marin O. Visual, vestibular and somatosensory contributions to balance control in the older adult. *J Gerontol.* 1989;44:M118–27.
74. Chen H, Nigg B, Hulliger M, de Koning J. Influence of sensory input on plantar pressure distribution. *Clin Biomech.* 1995;10:271–4.
75. Grigoriev AI, Kozlovskaya IB, Shenkman BS. The role of support afferents in organization of the tonic muscle system. *Russ J Physiol.* 2004;90:37–43.
76. Kozlovskaya IB, Tomilovskaya ES, Berger M, Gerstenbrand F. Alterations of characteristics of horizontal gaze fixation reaction in long-term space flights. *J Gravit Physiol.* 2007;14:P79–80.
77. Koryak YA. Electromyographic study of the contractile and electrical properties of human triceps surae muscle in a simulated microgravity environment. *J Physiol.* 1998;510:287–95.
78. Miller TF, Saenko IV, Popov DV, Vinogradova OL, Kozlovskaya IB. Effect of mechanical stimulation of the support zones of soles on the muscle stiffness in 7-day dry immersion. *J Gravit Physiol.* 2003;10:61–2.
79. Meier J, Topka MS, Hänggi J, Meier J, Topka MS. Differences in cortical representation and structural connectivity of hands and feet between professional handball players and ballet dancers. *Neural Plast.* 2016;2016:1–17.
80. Liepert J, Tegenthoff M, Malin J-P. Changes of cortical motor area size during immobilization. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol Mot Control.* 1995;97:382–6.
81. Kavounoudias A, Roll R. The plantar sole is a dynamometric map for human balance control. *Neuroreport.* 1998;9:3247–52.
82. Magnusson M, Enbom H, Johansson R, Pyykkö I. Significance of pressor input from the human feet in anterior–posterior postural control. *Acta Otolaryngol.* 1990;110:182–8.
83. Naito E, Hirose S. Efficient foot motor control by Neymar's brain. *Front Hum Neurosci.* 2014;8:594.
84. Jäncke L, Shah NJ, Peters M. Cortical activations in primary and secondary motor areas for complex bimanual movements in professional pianists. *Brain Res Cogn Brain Res.* 2000;10(1-2):177–83.
85. Picard N, Matsuzaka Y, Strick PL. Extended practice of a motor skill is associated with reduced metabolic activity in M1. *Nat Neurosci. Nature Research.* 2013;16:1340–7.
86. Lin CF, Lee IJ, Liao JH, Wu HW, Su FC. Comparison of postural stability between injured and uninjured ballet dancers. *Am J Sports Med.* 2011;39:1324–31.
87. Lin CW, Su FC, Lin CF. Influence of ankle injury on muscle activation and postural control during ballet grand plié. *J Appl Biomech.* 2014;30:37–49.
88. Steinberg N, Waddington G, Adams R, Karin J, Tirosh O. Use of a textured insole to improve the association between postural balance and ankle discrimination in young male and female dancers. *Med Probl Perform Art.* 2015;30:217–23.
89. Thain PK, Bleakley CM, Mitchell AC. Muscle reaction time during a simulated lateral ankle sprain after wet-ice application or cold-water immersion. *J Athl Train.* 2015;50:697–703.
90. Uchio Y, Ochi M, Fujihara A, Adachi N, Iwasa J, Sakai Y. Cryotherapy influences joint laxity and position sense of the healthy knee joint. *Arch Phys Med Rehabil.* 2003;84:131–5.
91. Karakaya MG, Rutbl H, Akpinar E, Yildirim A, Karakaya İÇ. Effect of ankle proprioceptive training on static body balance. *J Phys Ther Sci.* 2015;27:3299–302.
92. Han J, Anson J, Waddington G, Adams R. Sport attainment and proprioception. *Int J Sports Sci Coach.* 2014;9:159–70.
93. Davlin CD. Dynamic balance in high level athletes. *Mot Skills.* 2004;98:1171–6.