



apunts

MEDICINA DE L'ESPORT

www.apunts.org



## REVISIÓ

# Importància de la sensibilitat plantar en la regulació del control postural i del moviment: revisió

Caleb Araguas Garcia<sup>a,b,\*</sup>, Francisco Corbi Soler<sup>b</sup>, Carles Vergés Salas<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *Clinica podològica la Torrassa, Universitat de Barcelona, Barcelona, Espanya*

<sup>b</sup> *Departament de Salut, Facultat de Ciències de l'Activitat Física i l'Esport, Centre de Lleida, Universitat de Lleida, Lleida, Espanya*

<sup>c</sup> *Ensenyament de Podologia, Departament de Ciències Clíniques, Facultat de Medicina i Ciències de la Salut, Universitat de Barcelona, Barcelona, Espanya*

Rebut el 28 d'abril de 2016; acceptat el 12 de setembre de 2016

### PARAULES CLAU

Sensibilitat;  
Pell;  
Peu;  
Esport;  
Postura;  
Lesió

### KEYWORDS

Sensitivity;  
Skin;  
Foot;  
Sport;  
Posture;  
Injury

### Resum

L'objectiu d'aquesta revisió és analitzar la influència de la sensibilitat plantar en la millora de la capacitat de reequilibri i de gestió del moviment, analitzant els mecanismes que permeten valorar-la i descrivint els factors que hi influeixen. Es realitzà una cerca sistemàtica de la bibliografia publicada entre 2000 i 2016, a les bases de dades PubMed, Web of Science, SPORTDiscus i a les referències citades pels articles recuperats, publicats en espanyol o anglès. Es localitzà un total de 9 articles que foren recuperats i analitzats.

La majoria d'estudis suggereixen que la retroalimentació sensorial del peu és fonamental pel manteniment dels patrons generals (posturals i de desplaçament) i específics (esportius). L'alteració de la quantitat o qualitat de la informació aferent plantar no sols sembla que altera la creació dels diferents patrons, sinó que pot incrementar el risc d'aparició de lesions.

© 2017 FC Barcelona. Publicat per Elsevier España, S.L.U. Tots els drets reservats.

### 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,

\* Autor per a la correspondència

Correu electrònic: calebaraguas@hotmail.com (C. Araguas Garcia).

and SPORTDiscus, 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. 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.

© 2017 FC Barcelona. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

## Introducció

El peu és una estructura hipercomplexa sobre la qual se sustenta el cos i es caracteritza per ser l'única part que contacta amb el sòl. Entre les seves funcions, destaca la de proporcionar informació aferent al sistema nerviós central des dels receptors plantars, que és utilitzada posteriorment per mantenir la postura i generar patrons de moviment. En els últims anys, diverses línies de recerca s'han centrat en l'estudi de la influència que la informació aferent proporcionada pels receptors plantars del sistema somatosensorial exerceix sobre l'equilibri, el control postural i el moviment, així com en l'aparició de lesions<sup>1-4</sup>. Tenint en compte que la planta del peu és el límit entre el cos i la superfície sobre la qual se sustenta i que, a més, està dotada d'una gran quantitat de receptors sensitius, resulta lògic pensar que té una implicació directa en la gestió de la postura i del moviment<sup>5,6</sup>.

La pell és l'òrgan més gran del cos humà<sup>7</sup>, la funció de la qual és actuar com a barrera protectora, aïllant l'organisme del mitjà que l'envolta, protegint-lo i contribuint a mantenir íntegres les estructures, i actua com a sistema de comunicació altament eficient entre el cos i l'entorn més pròxim. A més, la pell del peu té unes característiques que la diferencien de la resta del cos humà: en primer lloc, l'epidermis presenta un espessor major, cosa que contribueix a millorar-ne la resistència i la capacitat d'amortir càrregues. En segon lloc, la pell del peu no té glàndules sebàcies, de manera que la pel·lícula hidrolipídica és menys rica en components grassos. Finalment, presenta un nombre elevat de glàndules sudoríparaes ecrines, a través de les quals s'elimina aigua, sals minerals i substàncies de rebuig<sup>8</sup>.

El grup de receptors plantars que possibiliten la sensibilitat del peu és heterogeni, degut a la diversa naturalesa dels diferents tipus de receptors cutanis i a la diversitat de fibres nervioses aferents existents<sup>9</sup>. Llevat dels nociceptors i dels termoreceptors, la majoria de les aferències cutànies corresponen als mecanoreceptors, que responen a estímuls de pressió i vibració, i es troben relacionats amb les fibres aferents mielíniques (fibres de velocitat de conducció ràpida)<sup>10</sup>.

Els mecanoreceptors poden classificar-se en dos grups: els d'adaptació ràpida i els d'adaptació lenta. Dins el primer grup, trobem els corpuscles de Meissner i els de Paccini<sup>11</sup>. Als primers també se'ls denomina tàctils, i són de localització superficial (intervenen en el tacte superficial i responen a vibracions de baixa freqüència)<sup>12,13</sup>. Per la seva banda, els corpuscles de Paccini es troben a la dermis profunda de la pell i a l'interior del teixit adipós plantar i responen de forma ràpida a sensacions de pressió profunda, vibració d'alta freqüència i estirament<sup>14</sup>.

També podem trobar dos tipus de mecanoreceptors d'adaptació lenta: els discos de Merkel i els corpuscles de Ruffini<sup>15</sup>. El disc de Merkel es localitza a la superfície de l'epidermis de la pell i està implicat en el tacte superficial o discriminatiu. Als corpuscles de Ruffini se'ls considera una variant dels corpuscles de Meissner, es localitzen més profundament i hi ha sensacions de tacte gros i persistent<sup>16</sup>.

A més, els nivells de sensibilitat de la superfície plantar poden variar enormement dins la població sana<sup>17</sup> i de la patològica<sup>18</sup>, i s'observen llistats d'activació molt diferents en funció de l'edat, la zona del peu, el sexe o el tipus d'estímul presentat (vibratori o de pressió)<sup>19</sup>. Tot això suggereix que la informació aferent plantar pot influir directament en la capacitat de reequilibri i en la creació de patrons motors.

Per això, l'objectiu principal d'aquest estudi és analitzar la influència de la sensibilitat plantar en la modificació de la capacitat de reequilibri i de la gestió del moviment, analitzant els mecanismes que permeten valorar-la i descrivint els factors que hi influeixen.

## Metodologia

Els diferents articles analitzats en aquest treball foren localitzats a les bases de dades informatitzades i accessibles en línia PubMed (Medline), Web of Science i SPORTDiscus. Les paraules clau utilitzades en la cerca foren: «sport injury», «sensitivity», «skin», «foot» i «posture». Els termes de cerca s'utilitzaren inicialment de forma independent i, després, combinats amb els termes AND i OR. Respecte als criteris de selecció, s'incloueren estudis experimentals i quasi-experimentals en anglès i publicats en revistes d'impacte. La cerca d'articles es limità de gener de 2000 a gener de 2016. A més, quant a la resta de criteris d'inclusió se seguí el referent PICR (Participants/Intervenció/Comparació/Resultats). L'organització dels articles inclosos es realitzà amb el programari de gestió de referències bibliogràfiques «Mendeley». Després d'analitzar els diferents estudis, es descartaren els duplicats, els d'escàs rigor metodològic, els estudis de casos o els de temàtica que no s'ajustava exactament als objectius de l'estudi i els que no se'n pogué obtenir el text.

## Resultats

L'estratègia de cerca i selecció d'articles d'aquesta revisió obtingué un total de 9 articles que finalment complien els criteris d'inclusió. Les característiques dels diferents estudis localitzats poden consultar-se a la taula 1.

S'han utilitzat diverses metodologies per valorar la sensibilitat plantar: tàctil<sup>29</sup>, algèsica<sup>30</sup>, tèrmica<sup>31</sup>, vibratòria<sup>32</sup>, barestèsica<sup>33</sup>, propiocepció<sup>34</sup> i reflexos<sup>35</sup> (taula 2). En general, aquestes metodologies solen utilitzar estímuls mecànics de diferent intensitat en punts simètrics d'ambdós hemisferis corporals o comparar el nivell de sensibilitat entre àrees corporals diferents<sup>36</sup>. Per a la qual cosa, sembla important que les valoracions es facin en absència de fatiga, ja que s'ha evidenciat que l'existència de fatiga sembla que influeix negativament en la valoració<sup>37</sup>. Tot i que gran part d'aquestes metodologies provenen de l'àmbit clínic<sup>38</sup>, moltes poden ser aplicades de forma directa o amb lleugeres modificacions en subjectes sans i esportistes<sup>39</sup>.

## Factors externs que influeixen en la sensibilitat plantar

### Temperatura

Diversos estudis han suggerit que l'aplicació local de fred sembla que incrementa de forma aguda l'activitat nerviosa simpàtica a la zona aplicada<sup>40</sup>, genera una vasoconstricció local reflexa<sup>41</sup>, disminueix la temperatura cutània<sup>42</sup> i altera la sensibilitat local<sup>43</sup>. En aquest sentit, Nurse i Nigg<sup>6</sup> constataren que el centre de pressió es desplaçava des de les zones on s'havia aplicat fred cap a les zones on la sensibilitat fos major, i també es registraren variacions en els patrons d'activitat muscular. Per la seva banda, Eils et al.<sup>44</sup>, seguint una metodologia similar, constataren reduccions en els pics de pressió plantar de les zones estimulades i una alteració en els patrons de pressió plantar. Aquest fet pot ser interpretat com una forma de protecció corporal que tractaria d'evitar el contacte a les zones del peu amb sensibilitat alterada, buscant un suport que sol·liciti les zones amb una sensibilitat major.

### Calçat

Diversos autors han teoritzat sobre la influència que el calçat esportiu pot tenir en l'alteració de la sensibilitat plantar, en la informació proporcionada per vies aferents des dels receptors plantars<sup>45</sup> i en la disminució del llinard d'estimulació<sup>46</sup>. Factors com la duresa, el disseny o el gruix de la sola del calçat<sup>47</sup>, el tipus de calçat<sup>48</sup>, el tipus de plantilla interior<sup>49</sup>, l'ús de determinat calçat específic com ara les botes de futbol<sup>50</sup>, sembla que influeixen directament en el nivell de sensibilitat plantar. A més, s'ha demostrat que l'ús de calçat amb cambra d'aire podria incrementar el nivell d'instabilitat del peu i augmentar el risc de lesió, fruit de la disminució d'informació aferent<sup>51</sup>, i que determinat calçat, com el calçat minimalista, també pot tenir repercussió sobre els nivells de sensibilitat plantar<sup>52</sup>, especialment quan provoca estímuls dolorosos<sup>53</sup>. En aquest sentit, queda clar que el tipus i les característiques del calçat utilitzat podrien generar modificacions en la quantitat i la qualitat de la informació recollida<sup>54</sup>.

### Tipus de superfície de contacte

La duresa del terreny o del calçat són factors que poden modificar la sensibilitat plantar i influir en el patró de mo-

viment<sup>55</sup>. Chiang i Wu<sup>56</sup> observaren que a mesura que la duresa del sòl esdevenia més tova l'estabilitat corporal disminuïa, els temps de resposta aferent augmentaven i les pressions plantars registrades es modificaven, fruit de l'alteració dels receptors cutanis i no dels musculars<sup>57</sup>.

### Hiperqueratosi

Les hiperqueratosis apareixen quan es produeix un engrossiment de la capa còrnia de l'epidermis originat per la hipertròfia (augment de la mida de les cèl·lules) o hiperplàsia (augment del nombre de les cèl·lules). Aquest increment de la mida o nombre de les cèl·lules afecta fonamentalment els queratinòcits o corneòcits, que són les cèl·lules més nombroses de la capa més externa de l'epidermis<sup>58</sup>. Les hiperqueratosis plantars són capaces d'inhibir la retroalimentació sensorial de la zona on es desenvolupen<sup>59</sup>, cosa que provoca un desplaçament del centre de pressió des de les àrees amb menor sensibilitat cap a les de major<sup>60</sup>.

### Vibracions mecàniques

Malgrat que la gran majoria d'estudis sobre la percepció vibrotàctil de la pell han estat fets a la mà, hi ha un alt grau de consens sobre la influència que les vibracions mecàniques tenen en el peu, especialment en determinades patologies com el peu diabètic. Aquest fet és degut a la gran quantitat de mecanoreceptors presents a la planta del peu (Kennedy i Inglis<sup>61</sup> en localitzaren 104 a la pell del peu humà) i a l'existència de llinars específics de vibració en funció de la zona del peu (s'han trobat llinars vibrotàctils més baixos a la planta del mediopeu que en el taló o els dits del peu)<sup>17</sup>. Tot això condiciona l'existència de respostes aferents específiques en funció del tipus d'estímul vibratori presentat. En aquest sentit, la utilització de vibracions mecàniques com a mètode d'entrenament s'ha constatat que pot alterar el nivell de sensibilitat plantar i afectar la capacitat de reequilibri<sup>62</sup>, especialment als 10 min posteriors a l'aplicació i quan les vibracions mecàniques són d'alta freqüència<sup>63</sup>.

### Plantilles propioceptives

Recentment s'ha suggerit que la col·locació a l'interior del calçat de plantilles de diferents textures sembla que millora el control postural<sup>64</sup> i incrementa la capacitat de discriminació posicional del turmell i prevé l'aparició de lesions<sup>65</sup> i crea patrons musculars més eficients<sup>66</sup>. A més, aquestes millores sembla que apareixen en relativament poc temps (5 setmanes)<sup>64</sup>. Santos et al.<sup>67</sup> constataren que la utilització de botes de futbol disminuïa la sensibilitat plantar degut a una reducció de la superfície de contacte peu-sòl i a un augment dels pics de pressió plantar, i que quan s'utilitzaven botes de futbol de forma combinada amb plantilles estimuladores la sensibilitat i la resposta propioceptiva milloraven considerablement.

### Discussió

Tradicionalment, el peu ha estat considerat com una baula fonamental dins el manteniment de l'equilibri postural<sup>68</sup>.

Taula 1 Característiques dels estudis realitzats sobre l'alteració de la sensibilitat plantar del peu

Autor (any)	Número mostra	Edat (anys)	Objectiu	Instrument valoració	Mecanisme alteració sensibilitat	Zona valorada	Resultats
Kavounoudias i Roll (1998) <sup>20</sup>	10	No especificat	Estudiar l'efecte que té l'aplicació de vibracions a la planta del peu en l'equilibri corporal	Oscil·lòmetres	Vibració	Peu	L'estímul provocà una inclinació corporal obliqua i involuntària sempre en direcció contrària a la zona del peu on s'aplica la vibració
Nurse i Nigg (1999) <sup>21</sup>	15	No especificat	Anàlitzar la relació existent entre la sensibilitat (a la pressió i a la vibració) i les pressions registrades a la planta del peu durant la marxa	Monofilaments de Semmes-Weinstein, oscil·lòmetre	Pressió vibració	Hàllux	Hi ha una correlació inversa entre el llindar de vibració de l'hàllux a freqüències altes i el pic màxim de pressió plantar detectat a l'hàllux durant la marxa i la cursa. Els subjectes amb més sensibilitat a l'hàllux presentaven pics superiors de pressió plantar a la cursa
Bensmaïa et al. (2005) <sup>22</sup>	22	No especificat	Investigar els efectes sobre la sensibilitat de vibratòria supralindar	Motor lineal de realimentació controlada	Vibració	Peu	L'aplicació d'estímuls vibratoris per damunt del llindar d'excitació pot alterar la capacitat d'activació dels mecanoreceptors aferents
Eils et al. (2005) <sup>23</sup>	40	25,3 ± 3,3	Determinar la influència de la reducció de la sensibilitat plantar, a través de la reducció de la temperatura del peu, en la distribució dels patrons de pressió plantar durant la marxa	Monofilaments de Semmes-Weinstein	Pressió	Planta del peu	La reducció de la temperatura cutània modifica els patrons de la distribució de la pressió de la planta del peu al llarg del seu recolzament
Wang i Lin. (2007) <sup>24</sup>	21	No especificat	Investigar la correlació entre el grau de pèrdua somatosensorial de la planta del peu i el grau d'estabilitat postural	No especificat	Tàctil	Planta del peu	La isquèmia està associada a l'increment de la pèrdua de sensibilitat plantar cutània i a un increment de la inestabilitat postural

Taula 1 (continuació)

Autor (any)	Número mostra	Edat (anys)	Objectiu	Instrument valoració	Mecanisme alteració sensibilitat	Zona valorada	Resultats
Meyer et al. (2004) <sup>25</sup>	6	26 ± 10	Associar la influència de l'anestèsia local subcutània injectada en la sensació plantar cutània i l'equilibri corporal	No especificat	Tàctil	Planta del peu	L'anestèsia local està associada a l'increment de la pèrdua de sensibilitat plantar cutània i a un increment de la inestabilitat postural, principalment quan no es disposa de la informació proporcionada per la vista
Burcal et al. (2016) <sup>26</sup>	45	20,2 ± 2,8	Determinar si existeixen diferències de sensació plantar entre els corredors que han sofert lesions de turmell i els que no	Instrument elèctric de llindar sensorial	Vibració	Arc plantar	Els corredors amb antecedents de lesió mostraren un augment del llindar vibratori a la regió de l'arc en comparació amb els corredors no lesionats. Una sensibilitat plantar major altera les funcions sensorials després de la lesió. Aquest factor pot influir en el control postural subjacent i contribuir a les respostes de càrrega alterades dels corredors lesionats
Vie et al. (2014) <sup>27</sup>	30	28,7 ± 8,6	Analitzar si la sensació plantar somatosensorial pot modificar-se amb l'ús de coixinets metatarsians durs	Stevens Power Function	Pressió	Avantpeu	Els coixinets metatarsians de duresa relativament alta augmentaren la percepció de l'estímul mecànic de l'avantpeu en comparació amb els coixinets metatarsians seus
Lipsitz et al. (2014) <sup>28</sup>	12	62,3 ± 4,5	Establir si el soroll vibratori subsensorial aplicat a la planta del peu mitjançant una plantilla vibratòria piezoelèctrica pot millorar la sensibilitat i l'equilibri	Plantilla d'espuma d'uretà amb sensor piezoelèctric	Vibració	Planta del peu	L'aplicació del principi de la ressonància estocàstica per al sistema sensorial del peu, emprant una nova tecnologia piezoelèctrica de baixa tensió, pot millorar les mesures de l'equilibri i de la marxa

**Taula 2** Metodologies per valorar la sensibilitat plantar

Autor i any	Denominació	Instrument a utilitzar	Protocol	Signes d'alerta
Pedro et al. (2011) <sup>29</sup>	Sensibilitat tàctil epicrítica	Pinzell, cotó	Subjecte estirat en una llitera exploratòria i privat de visió. Mitjançant un pinzell o un cotó, s'apliquen diferents passades en diverses zones dels peus, i el subjecte ha d'identificar quan se'l toca	El subjecte no és capaç de reconèixer la sensació en diferents punts del peu
Runkle et al. (2006) <sup>30</sup>	Sensibilitat algèsica	Agulla de cap de punta roma	Subjecte estirat en una llitera exploratòria i privat de visió. Mitjançant una agulla de cap de punta roma es pressiona a diferents zones del peu i es pregunta al pacient si té dolor	Si el subjecte no detecta l'estimulació en més d'un punt en cada peu
Cacicedo et al. (2011) <sup>31</sup>	Sensibilitat tèrmica	Barra tèrmica	Aplicar la barra tèrmica sobre diferents àrees del peu, evitant sempre les zones d'hiperqueratosi o lesionades	Quan la temperatura aplicada sobre el peu del subjecte sigui superior a 40 °C o inferior a 25 °C i ell sigui incapaç d'identificar-lo
Fernández et al. (2009) <sup>32</sup>	Sensibilitat vibratòria	Diapasó graduat de Rydel Seiffer (128 Hz)	Subjecte situat en decúbit supí en una llitera d'exploració, es fa vibrar un diapasó i es col·loca a la punta del primer dit del peu, al cap del primer metatarsià i es desplaça en direcció als mal·lèols tibials i peroneals	Quan el subjecte indica que deixa de sentir la vibració s'anota la mesura que apareix en el punt d'intersecció d'ambdós triangles
Gutiérrez et al. (2005) <sup>33</sup>	Sensibilitat barestèsica o pressora	Monofilament 5.07 de Semmens-Weinstein	Col·locació del subjecte en posició de decúbit supí en una llitera d'exploració. El sanitari ha de pressionar perpendicularment amb el monofilament sobre la pell i sense que hi llisqui. El fil s'ha de doblegar en un temps d'1 a 1,5 segons	Quan el pacient no pot sentir un dels punts en què es doblega el monofilament significa que la sensació tàctil ha disminuït per sota del llindar de protecció sensitiu
Sullivan et al. (2001) <sup>34</sup>	Propiocepció	-	Es col·loca una articulació o extremitat en una posició determinada i s'insta el participant a reproduir la mateixa posició a l'extremitat contralateral	No és capaç de reproduir la posició amb l'extremitat contralateral
Singh et al. (2005) <sup>35</sup>	Reflex aquil·lià	Martell neuropercutor	Aplicació d'un petit cop amb el martell neuropercutor en el tendó d'Aquil·les per provocar una resposta flexora plantar del peu	L'absència de resposta reflexa indica que el pacient pateix una afectació neuropàtica

Els primers models que tractaren d'explicar com es reequilibrava el ser humà presentaven el cos com un pèndul invertit<sup>69</sup>, l'eix de rotació del qual es situava en el turmell i en què les oscil·lacions constants del centre de gravetat eren reajustades, gràcies a la informació proporcionada a través

de les vies aferents<sup>70</sup>. Tot i que posteriorment foren presentats altres models explicatius que atribuïen al maluc un paper fonamental dins del procés de reequilibri<sup>71</sup>, actualment hi ha un cert consens sobre l'existència d'un model combinat i intermitent en què interaccionen de forma específica

les diferents parts del cos implicades en una postura o moviment<sup>72</sup>, configurat, en gran part, a partir de la informació proporcionada pel sistema somatosensorial<sup>73</sup>.

En aquest sentit, sembla que la informació proporcionada pels receptors plantars resulta fonamental, ja que sembla que qualsevol alteració de la sensibilitat dels receptors cutanis de la planta del peu pot tenir implicacions directes en l'alteració dels patrons cinètics i musculars de recolzament<sup>74</sup>. Així, per exemple, diversos estudis han observat que, en subjectes sotmesos a ingravidesa, la pèrdua d'informació aferent proporcionada per la planta del peu pot provocar una disminució de l'activitat de la musculatura tònica<sup>75</sup>. Kozlovskaya et al.<sup>76</sup> constataren que en submergir un grup de subjectes a l'interior d'un tanc amb aigua durant un període de temps perllongat es produïa una disminució dels nivells d'activació de la musculatura tonicopostural extensora<sup>77</sup> i un augment dels de la flexora<sup>78</sup>, com a conseqüència de l'eliminació de la informació aferent proporcionada per la planta del peu. Malgrat que una gran part d'aquestes modificacions es produeixen localment, tot això suggereix que també podrien generar-se modificacions a nivell cerebral<sup>79</sup>. Així, per exemple, Liepert et al.<sup>80</sup> constataren que després d'una immobilització del peu d'entre quatre i sis setmanes com a conseqüència d'una fractura es produïa en el cervell un decrement de la representació cortical a l'àrea del peu.

De forma similar, sembla que una disminució dels nivells de retroalimentació sensorial en àrees selectives del peu durant la marxa pot provocar un desplaçament del centre de pressió plantar, des de les zones on s'ha produït una pèrdua de sensibilitat cap a les àrees de la planta del peu amb major sensibilitat<sup>81</sup>, cosa que pot generar canvis en els patrons de pressió plantar (pic de pressió i integral pressió-temps). A més, sembla que tot això pot tenir repercussió sobre els músculs implicats en el moviment i el seu nivell d'activitat<sup>82</sup>.

En canvi, diversos estudis suggereixen que determinades activitats podrien afavorir la capacitat local de recollida d'informació aferent o la capacitat central d'activació d'àrees cerebrals concretes, generant adaptacions específiques fruit de l'entrenament. Meier et al.<sup>79</sup> constataren, en comparar jugadors professionals d'handbol amb ballarines professionals, que elles eren capaces d'optimitzar el nivell d'activació de zones cerebrals específiques relacionades amb el control segmentari del peu. Aquest fet podria ser degut, si més no en part, a una capacitat sensitiva major desenvolupada en les ballarines pel fet de treballar descalces, adoptar diferents posicions sobre el peu en situacions d'instabilitat i estimular àrees de contacte molt reduïdes. De forma similar, també s'ha constatat millora en els nivells d'activació cerebral en esportistes que utilitzen els peus de forma específica al seu esport. Un estudi que comparà el jugador de futbol Neymar Jr. amb altres jugadors de futbol (tres professionals i un amateur) i amb dos nadadors professionals observà que aquest jugador presentava una menor activitat neural en la zona del cervell relacionada amb el peu quan feia moviments simples, cosa que s'interpreta com a signe d'eficiència<sup>83</sup>. A més, aquests resultats van en la línia dels obtinguts en altres regions del cos, com les mans, en grups que habitualment han de desenvolupar grans prestacions, com en el cas de pianistes i teclistes<sup>84</sup>, i s'ha observat que també es dona en primats no humans<sup>85</sup>.

Això suggereix que les alteracions de la informació proporcionada de forma aferent des dels peus podrien modificar els patrons d'activació muscular durant la bipedestació<sup>41</sup>, i influeixen de forma directa sobre els nivells d'estabilitat postural.

D'altra banda, diversos estudis han mostrat l'existència d'una relació directa entre disminució de la sensibilitat plantar i un risc més gran de lesió. Així, per exemple, s'ha constatat que els esportistes que han sofert lesions de turmell presenten nivells d'estabilitat postural menors<sup>86</sup>, una disminució dels nivells d'estabilitat articular i uns patrons motors alterats<sup>87</sup>. De forma similar, Steinberg et al.<sup>88</sup> observaren que pacients amb lesió del lligament encreuat anterior tenien pitjor sensibilitat vibratòria del peu i del turmell.

Aquestes alteracions sembla que són fruit de l'aparició d'una modificació de la funcionalitat dels canals d'informació aferent provocada per la lesió, cosa que justifica la necessitat de reeducar i optimitzar la funcionalitat. D'altra banda, s'ha qüestionat la possible influència negativa que la crioteràpia (com a tractament o mètode de recuperació) podria tenir sobre la capacitat de propiocepció, i es constata que els efectes sobre la capacitat propioceptiva poden variar en funció del temps d'aplicació<sup>89</sup> i de la zona corporal analitzada<sup>90</sup>.

Diversos autors han investigat l'efecte que l'entrenament propioceptiu del turmell genera en l'equilibri corporal estàtic, i han constatat que en individus sans genera efectes positius<sup>91</sup>. Han et al.<sup>92</sup> mesuraren la capacitat propioceptiva del turmell de 100 esportistes d'elit de 5 esports diferents (gimnàstica, futbol, natació, bàdminton i ball) i observaren una relació directa entre el nivell de propiocepció del turmell i el rendiment esportiu, fins i tot a nivell olímpic. Tot sembla indicar que obtenir millora de l'equilibri corporal a través de la sensibilitat plantar permet disminuir el nivell d'atenció que l'esportista ha de dedicar, conscientment o inconscientment, al manteniment de l'estabilitat corporal, i pot dedicar-se a millorar el gest esportiu. Un estudi que compara gimnastes amb esportistes que no treballaven de forma específica la propiocepció observa que els gimnastes minven la dependència dels processos de control postural quan se'ls sotmet a tasques diferents o d'una complexitat més gran<sup>93</sup>. Per això, sembla lògic pensar que un entrenament específic dels receptors plantars podria tenir efectes positius en la creació i l'optimització de patrons motors. Per això, caldria considerar-ne la millora, tant en activitats esportives com en programes preventius i de tractament de lesions.

## Conclusions i recomanacions

Segons suggereix la nostra revisió, la retroalimentació sensorial del peu resulta fonamental per al manteniment dels patrons generals (posturals i de desplaçament) i específics (esportius). Una alteració en la quantitat o qualitat de la informació aferent plantar no sols pot alterar la creació dels diferents patrons, sinó que pot incrementar el risc d'aparició de lesions. En aquest sentit, és bàsic el manteniment i l'optimització de la capacitat de recollida d'informació aferent dels diferents sistemes, com a forma d'evitar

l'aparició de lesions i patologies i de millorar el rendiment. La monitorització contínua dels nivells de recollida d'informació, així com la creació de tasques d'estimulació, són alternatives que caldria considerar.

## Conflicte d'interessos

Els autors declaren que no tenen cap conflicte d'interessos.

## Bibliografia

- 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.
- 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.
- Fort A, Romero D. Rol del sistema sensoriomotor en la estabilidad articular durante las actividades deportivas. *Apunts Med Esport.* 2013;48:69-71.
- Robbins SE, Hanna AM, Govw G. Overload protection avoidance response to heavy plantar surface loading. *Med Sci Sports Exerc.* 1988;20:85-92.
- Corbi F. Análisis de las presiones plantares y su relación con la velocidad de la pelota durante el goleo paralelo de derecha en tenis [tesi doctoral]. Barcelona: Universidad de Barcelona; 2008.
- Nurse MA, Nigg BM. The effect of changes in foot sensation on plantar pressure and muscle activity. *Clin Biomech (Bristol).* 2001;16:719-27.
- Freedberg A, Fitzpatrick's I. *Dermatology in General Medicine.* 5th ed. New York: McGraw-Hill; 1999.
- Fustero I. Cuidado de los pies. *Offarm.* 2007;2:66-72.
- Dupui PH, Costes-Salon MC, Montoya R, Séverac A, Lazerges M, Pagès B, et al. Intérêt de l'analyse fréquentielle des oscillations posturales lors de l'équilibre dynamique. *Société d'études et de recherches multidisciplinaires sur la locomotion.* Paris: Collège de France. 1990.
- Dupui PH, Montoya R. Approche physiologique des analyses posturographiques statiques et dynamiques. *Physiologie, Techniques, Pathologies.* 3me ed. Paris: Posture et Equilibre; 2003.
- Vega JA, García-Suárez O, Montaña JA, Pardo B, Cobo JM, The Meissner and Pacinian sensory corpuscles revisited new data from the last decade. *Microsc Res Tech.* 2009;72:299-309.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Thibodeau GA, Patton KT. *Anatomía y fisiología.* 6a ed. Madrid: Elsevier; 2007.
- Kekoni J, Hämäläinen H, Rautio J, Tukeua T. Mechanical sensitivity of the sole of the foot determined with vibratory of varying frequency. *Experimental brain research. Experimentelle Hirnforschung. Exp Brain Res.* 1989;78:419-24.
- Rautio J, Kekoni J, Mämäläinen H, Härmä A. Mechanical sensitivity in free and island flups of the foot. *J Reconstr Microsurg.* 1989;5:119-25.
- Hennig EM, Sterzing T. Sensitivity mapping of the human foot: Thresholds at 30 skin locations. *Foot Ankle Int.* 2009;30:986-91.
- Kavounoudias A, Roll R, Roll JP. The plantar sole is a 'dynamometric map' for human balance control. *Neuroreport.* 1998;9: 3247-52.
- Nurse MA, Nigg BM. Quantifying a relation ship between tactile and vibration sensitivity of human foot with plantar pressure distributions during gait. *Clin Biomech (Bristol).* 1999;14:667-72.
- Bensmaïa SJ, Leung YY, Hsiao SS, Johnson KO. Vibratory adaptation of cutaneous mechanoreceptive afferent. *J Neurophysiol.* 2005;94:3023-36.
- 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.
- Wang TY, Lin S. Sensitivity of plantar cutaneous sensation and postural stability. *Clin Biomech.* 2008;23:493-9.
- 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.
- 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.
- Vie B, Loffredo R, Sanahdji 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.
- 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.
- Pedro J, Rivera AM, Olivan RM. Manejo del pie diabético. *Guía de Enfermería.* 2011;79:29-41.
- 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.
- Cacicedo R, Castañeda C, Cosío F, Delgado A, Fernández B, Gómez M, et al. Manual de prevención y cuidados locales de heridas crónicas. Cantabria: Servicio Cántabro de Salud; 2011.
- Fernández T, Montequín F. Manual para la prevención, diagnóstico y tratamiento del pie diabético. *Rev Cuba Angiol Cirug Vasc.* 2009;10:42-96.
- Gutiérrez T, Reyes R, Pizarro C. Pie diabético, una visión fisiológica. *Rev Hosp Clin Univ Chile.* 2005;16:14-23.
- O'Sullivan S. *Assessment of Motor Function.* Philadelphia: Physical Rehabilitation; 2005.
- Singh N, Armstrong D, Lipsky B. Preventing foot ulcers in patients with diabetes. *JAMA.* 2005;293:217-28.
- Bates B, Bickley LS, Hoekelman RA. *A guide to physical examination and history taking.* 6th ed. Philadelphia: JB Lippincott; 1995.
- Sweeny VP. History and physical examination in patients with neurologic complaints. A: Kelley WN, De Vita VT, editors. *Textbook of Internal Medicine.* 2nd ed. Philadelphia: JB Lippincott; 1992. pp. 2251-5.
- Murray J. Neurologic history and examination. A: Stein JH, editor. *Internal Medicine.* 4th ed. St Louis: Mosby-Year Book; 1994. pp. 960-1.



39. Martin JB, Hauser SL. Estudio del paciente con una enfermedad neurológica. A: Braunwald E, editor. Harrison, principios de medicina interna. 15a ed. México DF: McGraw-Hill Interamericana; 2002. pp. 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. *J Biomech*. 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, Goldstein-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 Posture*. 1996;4:122-9.
57. Chiang J, Wu G. The influence of foam surfaces on biomechanical variables contributing to postural control. *Gait 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. A: 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. 855-64.
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;10:177-83.
85. Picard N, Matsuzaka Y, Strick PL. Extended practice of a motor skill is associated with reduced metabolic activity in M1. *Nat Neurosci.* 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, Rutblil H, Akpınar E, Yildirim A, Karakaya IC. 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.