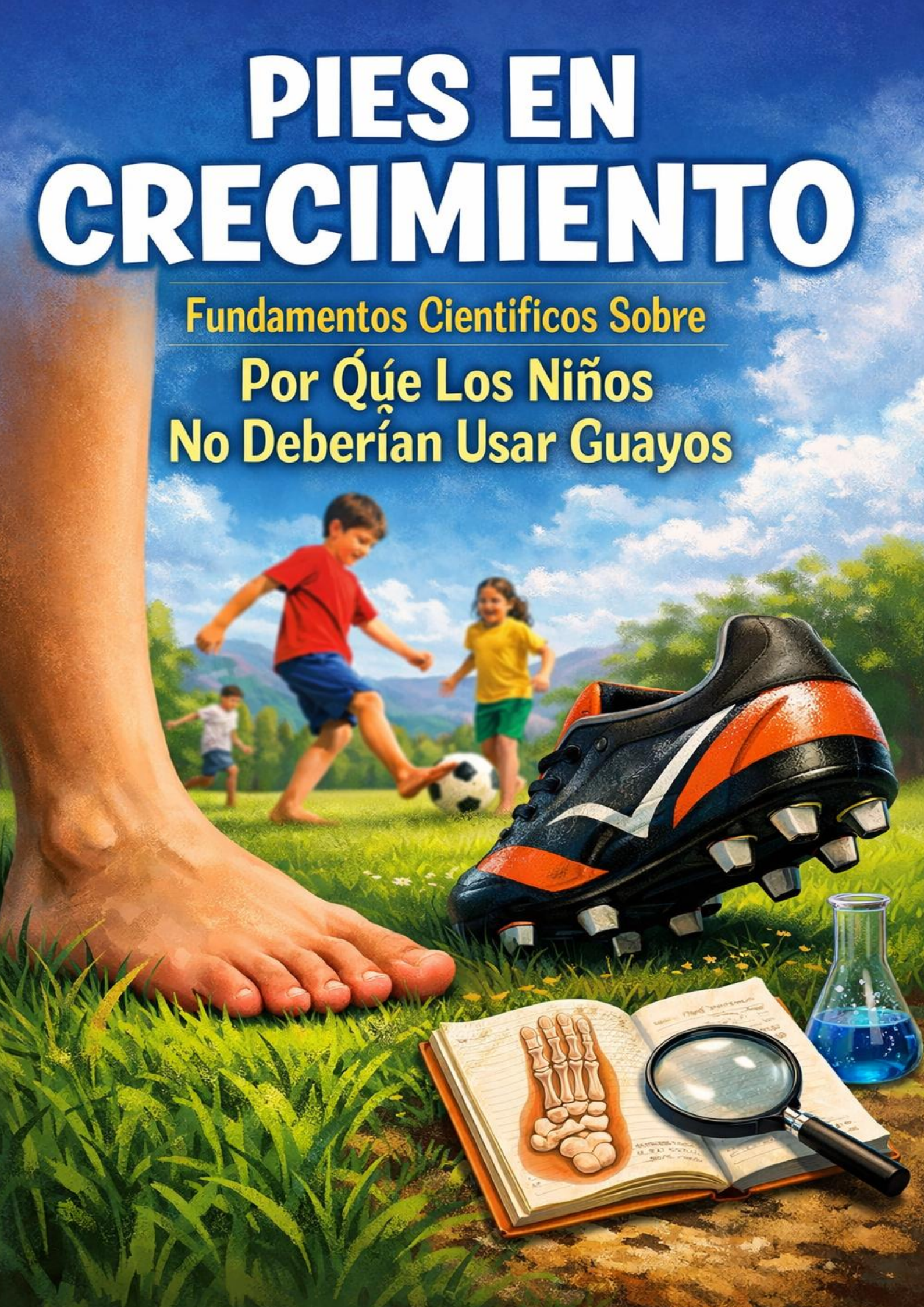


PIES EN CRECIMIENTO

Fundamentos Científicos Sobre
Por Qué Los Niños
No Deberían Usar Guayos



El libro **PIES EN CRECIMIENTO: fundamentos científicos sobre porque los niños no deberían usar guayos** está avalado por un sistema de evaluación por pares doble ciego, también conocido en inglés como sistemas “double-blind paper review” registrados en la base de datos de la **EDITORIAL CIENCIA DIGITAL** con registro en la Cámara Ecuatoriana del Libros No.663 para la revisión de libros, capítulos de libros o compilación.

Evaluadores:

-

ISBN_978-9942-595-08-9

Primera edición, mayo 2026

Edición con fines didácticos

Coeditado e impreso en Ambato - Ecuador

El libro que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Editorial Ciencia Digital**.

El libro queda en propiedad de la editorial y por tanto su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Editorial Ciencia Digital**.



Jardín Ambateño, Ambato, Ecuador

Teléfono: 0998235485 – 032-511262

Publicación:

w: www.cienciadigitaleditorial.com

w: <http://libros.cienciadigital.org/index.php/CienciaDigitalEditorial>

e: luisefrainvelastegui@cienciadigital.org

AUTORES

AUTORES

- **Fabian Andres Contreras Jauregui**
(Universidad del Atlántico)
- **Iván David Ortiz Pimienta**
(Universidad de Pamplona)
- **Javit Enrique Luna Manjarres**
(Universidad del Magdalena)
- **Luis Efraín Velasteguí López**
(Universidad Bolivariana del Ecuador)

 **CIENCIA DIGITAL EDITORIAL**

La **Editorial Ciencia Digital**, creada por Dr.C. Efraín Velasteguí López PhD. en 2017, está inscrita en la Cámara Ecuatoriana del Libro con registro editorial No. 663.

El **objetivo** fundamental de la **Editorial Ciencia Digital** es un observatorio y lugar de intercambio de referencia en relación con la investigación, la didáctica y la práctica artística de la escritura. Reivindica a un tiempo los espacios tradicionales para el texto y la experimentación con los nuevos lenguajes, haciendo de puente entre las distintas sensibilidades y concepciones de la literatura.

El acceso libre y universal a la cultura es un valor que promueve Editorial Ciencia Digital a las nuevas tecnologías esta difusión tiene un alcance global. Muchas de nuestras actividades están enfocadas en este sentido, como la biblioteca digital, las publicaciones digitales, a la investigación y el desarrollo.

Desde su creación, la Editorial Ciencia Digital ha venido desarrollando una intensa actividad abarcando las siguientes áreas:

- Edición de libros y capítulos de libros
- Memoria de congresos científicos
- Red de Investigación

Editorial de las revistas indexadas en Latindex 2.0 y en diferentes bases de datos y repositorios: **Ciencia Digital** (ISSN 2602-8085), **Visionario Digital** (ISSN 2602-8506), **Explorador Digital** (ISSN 2661-6831), **Conciencia Digital** (ISSN 2600-5859), **Anatomía Digital** (ISSN 2697-3391) & **Alfa Publicaciones** (ISSN 2773-7330).

ISBN: 978-9942-595-08-9 Versión Electrónica

- Los aportes para la publicación de esta obra, está constituido por la experiencia de los investigadores

EDITORIAL REVISTA CIENCIA DIGITAL



 Efraín Velasteguí López¹

Contacto: Ciencia Digital, Jardín Ambateño, Ambato- Ecuador

Teléfono: 0998235485 - 032511262

Publicación:

w: www.cienciadigitaleditorial.com

e: luisefrainvelastegui@cienciadigital.org

Editora Ejecutiva

Dr. Tatiana Carrasco R.

Director General

Dr.C. Efraín Velasteguí PhD.

¹ **Efraín Velasteguí López:** Magister en Tecnología de la Información y Multimedia Educativa, Magister en Docencia y Currículo para la Educación Superior, Doctor (**PhD**) en Ciencia Pedagógicas por la Universidad de Matanza Camilo Cien Fuegos Cuba, cuenta con más de 120 publicaciones en revista indexadas en Latindex y Scopus, 21 ponencias a nivel nacional e internacional, 16 libros con ISBN, en multimedia educativa registrada en la cámara ecuatoriano del libro, tres patente de la marca Ciencia Digital, Acreditación en la categorización de investigadores nacionales y extranjeros Registro REG-INV-18-02074, Director, editor de las revistas indexadas en Latindex Catalogo 2.0, Ciencia Digital, Visionario Digital, Explorador Digital, Conciencia Digital, Anatomía Digital, Alfa Publicaciones y editorial Ciencia Digital registro editorial No 663. Cámara Ecuatoriana del libro director de la Red de Investigación Ciencia Digital, emitido mediante Acuerdo Nro. SENESCYT-2018-040, con número de registro REG-RED-18-0063

EJEMPLAR GRATUITO
PROHIBIDA SU VENTA



El “copyright” y todos los derechos de propiedad intelectual y/o industrial sobre el contenido de esta edición son propiedad de CDE. No está permitida la reproducción total y/o parcial de esta obra, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, electrónico, mecánico, por fotocopia o por registro u otros medios, salvo cuando se realice con fines académicos o científicos y estrictamente no comerciales y gratuitos, debiendo citar en todo caso a la editorial.

PRESENTACION

La obra *Pies en crecimiento: Fundamentos científicos sobre por qué los niños no deberían usar guayos* surge como una contribución académica y científica orientada a comprender, desde una perspectiva integral, el desarrollo del pie infantil y su relación con las prácticas deportivas contemporáneas. En un contexto donde la especialización deportiva temprana y el uso de implementos diseñados para adultos han ganado protagonismo, se hace imprescindible cuestionar críticamente dichas prácticas a la luz de la evidencia científica.

El pie infantil no constituye una versión reducida del pie adulto, sino una estructura en constante transformación, caracterizada por su plasticidad, adaptabilidad y alta sensibilidad a los estímulos mecánicos. Este libro propone un análisis profundo de los procesos anatómicos, fisiológicos, biomecánicos y neuromotores que intervienen en su desarrollo, evidenciando cómo factores externos, como el uso prematuro de guayos, pueden interferir en su maduración natural.

A lo largo de sus capítulos, el lector encontrará una integración rigurosa entre teoría científica y aplicación práctica, abordando no solo la estructura del pie en crecimiento, sino también la forma en que los niños caminan, corren, distribuyen cargas y responden a diferentes estímulos del entorno. Esta perspectiva multidimensional permite comprender que cualquier intervención sobre el pie infantil debe estar sustentada en el respeto por los tiempos biológicos de desarrollo.

Esta obra está dirigida a profesionales de la educación física, entrenadores, fisioterapeutas, médicos, investigadores y padres de familia, interesados en promover un desarrollo saludable y funcional del sistema locomotor infantil. Su propósito no es únicamente informar, sino generar conciencia crítica y fundamentada sobre prácticas que, aunque socialmente aceptadas, pueden resultar contraproducentes para la salud a largo plazo.

En síntesis, este libro busca posicionarse como un referente académico que contribuya a la toma de decisiones responsables en el ámbito deportivo infantil, priorizando siempre el bienestar, la prevención y el desarrollo integral del niño.

PROLOGO

El desarrollo del conocimiento científico en torno al cuerpo humano ha permitido comprender que muchas prácticas tradicionalmente aceptadas requieren ser revisadas a la luz de nuevas evidencias. En el ámbito del deporte infantil, uno de los temas menos explorados —pero de gran relevancia— es la relación entre el uso del calzado deportivo especializado y el desarrollo del pie en crecimiento.

Esta obra representa un esfuerzo riguroso por abordar esta problemática desde una perspectiva interdisciplinaria, integrando aportes de la anatomía, la biomecánica, la fisiología del ejercicio, la kinesiología y las ciencias del desarrollo motor. El autor plantea, con fundamento científico, que el uso de guayos en etapas tempranas puede generar alteraciones en la distribución de cargas, limitar la función propioceptiva y afectar la evolución natural del arco plantar.

Lo más valioso de este trabajo no radica únicamente en su profundidad teórica, sino en su capacidad para cuestionar paradigmas arraigados en la cultura deportiva. En muchos contextos, el uso de guayos en niños es percibido como un símbolo de profesionalización o avance competitivo; sin embargo, esta obra demuestra que dicha práctica puede ser incompatible con las necesidades biológicas del pie infantil.

El lector encontrará aquí una argumentación sólida, sustentada en evidencia científica actualizada, que invita a reflexionar sobre la importancia de respetar los procesos de maduración estructural y funcional del cuerpo en crecimiento. Asimismo, se destaca la relevancia del entorno, la experiencia motriz y la exposición a estímulos variados como factores clave en el desarrollo saludable del pie.

Este libro no pretende imponer verdades absolutas, sino abrir un espacio de diálogo académico y profesional que permita repensar las prácticas deportivas desde una perspectiva preventiva y formativa. Su aporte resulta especialmente

significativo en un momento histórico donde la salud infantil y la calidad del desarrollo motor deben ser prioridades fundamentales.

Sin duda, esta obra se convertirá en un referente para quienes buscan comprender el impacto real de las decisiones aparentemente simples —como el tipo de calzado— en el desarrollo integral del niño.

Índice

INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO 1	15
DESARROLLO DEL PIE EN LA INFANCIA	15
CAPÍTULO 2	40
BIOMECÁNICA DEL MOVIMIENTO	40
CAPITULO 3	69
HISTORIA Y EVOLUCIÓN DEL CALZADO DEPORTIVO	69
CAPÍTULO 4	94
RIESGOS DEL USO DE GUAYOS EN NIÑOS.....	94
CAPÍTULO 5	122
BENEFICIOS DE LA ESTIMULACIÓN NATURAL DEL PIE	122
CAPÍTULO 6	144
GUÍAS PRÁCTICAS PARA PADRES Y ENTRENADORES	144
CAPITULO 7	174
FUTURO Y RECOMENDACIONES.....	174
REFERENCIAS.....	179

INTRODUCCIÓN

El desarrollo del pie humano durante la infancia constituye un proceso complejo, dinámico y altamente sensible a los estímulos mecánicos y ambientales. Lejos de ser una estructura estática, el pie infantil se encuentra en constante transformación, integrando cambios anatómicos, fisiológicos, biomecánicos y neuromotores que configuran su función futura dentro del sistema locomotor.

En este contexto, la creciente participación de niños en actividades deportivas organizadas ha generado la adopción temprana de implementos diseñados para adultos, entre ellos los guayos. Este fenómeno plantea interrogantes fundamentales sobre la compatibilidad entre las demandas mecánicas impuestas por dicho calzado y las características estructurales del pie en crecimiento.

El presente libro tiene como objetivo analizar, desde una perspectiva científica, las implicaciones del uso de guayos en la infancia, considerando los principios del desarrollo biológico y la adaptación funcional. A través de una revisión exhaustiva de la literatura y un enfoque interdisciplinario, se busca evidenciar cómo la exposición a cargas específicas, superficies rígidas y estructuras restrictivas puede influir en la maduración del pie infantil.

La obra se estructura en varios capítulos que abordan, de manera progresiva, los fundamentos anatómicos del pie, las etapas de crecimiento, la formación del arco plantar, las diferencias entre el pie infantil y adulto, y la biomecánica del movimiento en niños. Posteriormente, se analizan las características de la marcha y la carrera infantil, así como la distribución de cargas y su relación con el entorno y el tipo de calzado.

Uno de los ejes centrales del libro es la comprensión del pie como un órgano no solo mecánico, sino también sensorial, cuya interacción con el entorno resulta fundamental para el desarrollo del control motor y la estabilidad postural. En este sentido, cualquier intervención que limite su función natural puede tener repercusiones en la cadena cinética global.

Asimismo, se plantea la necesidad de diferenciar entre variaciones fisiológicas del desarrollo y verdaderas patologías, evitando intervenciones innecesarias que

puedan interferir con los procesos adaptativos naturales. Esta distinción resulta clave para orientar adecuadamente la práctica clínica, la educación física y el entrenamiento deportivo en edades tempranas.

Finalmente, esta obra propone una reflexión crítica sobre la forma en que se concibe el rendimiento deportivo infantil, enfatizando que el desarrollo a largo plazo debe prevalecer sobre los resultados inmediatos. El respeto por la biología del crecimiento, la promoción del movimiento natural y la toma de decisiones informadas constituyen pilares fundamentales para garantizar la salud y funcionalidad del pie en la vida adulta.

En consecuencia, este libro no solo ofrece conocimiento, sino que invita a transformar la manera en que se aborda el desarrollo motor infantil, promoviendo prácticas más conscientes, fundamentadas y orientadas al bienestar integral del niño.





CAPITULO I

DESARROLLO DEL PIE EN LA INFANCIA



Anatomía y fisiología del pie humano

El pie humano representa una de las estructuras anatómicas más complejas y biomecánicamente sofisticadas del cuerpo, constituyendo la base funcional de la bipedestación y el desplazamiento eficiente. Su arquitectura integra 26 huesos, organizados en una configuración tridimensional que combina estabilidad estructural y movilidad adaptativa, permitiendo soportar cargas que durante la marcha pueden oscilar entre 1,2 y 1,5 veces el peso corporal, y durante la carrera alcanzar valores superiores a tres veces dicho peso. Esta capacidad de soportar y redistribuir fuerzas se debe a la disposición estratégica de sus segmentos óseos, al entramado ligamentoso que actúa como sistema de contención pasiva y a la musculatura intrínseca y extrínseca que regula activamente su comportamiento dinámico. Desde una perspectiva evolutiva, el pie humano ha sufrido modificaciones estructurales significativas en comparación con el pie prensil de otros primates, particularmente en el desarrollo del arco longitudinal medial y en la alineación del hallux, elementos que favorecen la propulsión y la economía energética del desplazamiento (Moore, Dalley, & Agur, 2018).

Anatómicamente, el pie se divide en retropié, mediopié y antepié, regiones que no solo poseen diferencias estructurales sino también funciones biomecánicas diferenciadas y complementarias. El retropié, compuesto por el calcáneo y el astrágalo, constituye la primera unidad receptora de carga en el contacto inicial de la marcha. El astrágalo, al carecer de inserciones musculares, actúa como un verdadero distribuidor mecánico entre la tibia y el resto del pie, transmitiendo fuerzas a través de la articulación subtalar hacia el calcáneo. Este último, por su tamaño y orientación, cumple una función de amortiguación inicial, especialmente durante la fase de apoyo. La relación articular entre estos huesos permite movimientos de inversión y eversión que facilitan la adaptación del pie a superficies irregulares, reduciendo el estrés transmitido hacia estructuras proximales como rodilla y cadera (Neumann, 2017).

El mediopié, integrado por el navicular, el cuboides y los tres cuneiformes, representa el núcleo estructural del sistema de arcos plantares. La articulación mediotarsiana o articulación de Chopart permite que el pie transite entre configuraciones flexibles y rígidas según las demandas funcionales. En la fase

de absorción de impacto, el mediopié adopta una disposición más laxa que favorece la disipación de energía; mientras que en la fase propulsiva, se transforma en una estructura más estable mediante el acoplamiento de superficies articulares y la tensión ligamentosa. Esta capacidad de transición refleja un equilibrio biomecánico fino entre movilidad y estabilidad, cuyo deterioro puede alterar la eficiencia locomotora (Kapandji, 2019).

El antepié, conformado por los metatarsianos y las falanges, desempeña un papel esencial en la propulsión y en la distribución final de cargas durante la fase terminal del apoyo. El primer metatarsiano y el hallux poseen relevancia particular debido a su contribución en la generación de fuerza hacia adelante. La alineación del primer radio influye directamente en la estabilidad del arco medial y en la eficiencia del mecanismo de “windlass”, proceso mediante el cual la dorsiflexión del hallux tensa la fascia plantar elevando el arco longitudinal medial. Alteraciones en esta región pueden comprometer la biomecánica global del pie y predisponer a sobrecargas crónicas (Neumann, 2017).

Desde el punto de vista ligamentoso, el pie posee una compleja red de estructuras estabilizadoras pasivas, entre las que destaca el ligamento calcaneonavicular plantar (ligamento resorte), responsable de sostener la cabeza del astrágalo y preservar la integridad del arco medial. La fascia plantar, por su parte, actúa como un sistema de tensión continua que contribuye al almacenamiento y liberación de energía elástica durante la marcha. Esta propiedad elástico-mecánica permite reducir el gasto energético en cada ciclo de paso, demostrando que el pie funciona como un verdadero resorte biológico (Kapandji, 2019).

La musculatura intrínseca del pie, organizada en cuatro capas plantares, desempeña una función crucial en la estabilidad dinámica. Aunque su tamaño es reducido en comparación con la musculatura extrínseca, su activación coordinada regula la posición de los dedos, estabiliza las cabezas metatarsianas y contribuye al mantenimiento activo del arco plantar. Estudios electromiográficos han demostrado que estos músculos se activan de manera anticipatoria durante tareas de equilibrio, evidenciando su rol en la modulación postural (Hall & Brody, 2019).

La musculatura extrínseca, proveniente de la pierna, incluye músculos como el tibial anterior, tibial posterior, peroneos y tríceps sural, cuya acción combinada permite controlar los movimientos globales del pie. El tibial posterior, por ejemplo, es fundamental para la estabilidad del arco medial, mientras que los peroneos contribuyen al equilibrio lateral. La coordinación neuromuscular entre estos grupos garantiza una transición fluida entre pronación y supinación durante la marcha (Neumann, 2017).

Fisiológicamente, el pie posee una alta densidad de mecanorreceptores cutáneos y propioceptivos que proporcionan información sensorial constante al sistema nervioso central. Esta retroalimentación permite ajustar la activación muscular según las condiciones del terreno, optimizando la distribución de cargas y previniendo lesiones. El componente sensorial del pie es, por tanto, indispensable para el control motor fino y para la estabilidad en bipedestación (Hall & Brody, 2019).

La biomecánica de la marcha revela que el pie no actúa como una estructura rígida permanente, sino como un sistema adaptable que alterna entre fases de pronación controlada y supinación rígida. La pronación facilita la absorción de impacto mediante la dispersión de fuerzas, mientras que la supinación crea una palanca eficiente para la propulsión. Este equilibrio funcional es esencial para la economía del movimiento humano (Neumann, 2017).

La vascularización plantar, derivada principalmente de las arterias tibial anterior y posterior, no solo asegura el aporte metabólico a los tejidos, sino que también participa en la regulación térmica y en la cicatrización. La bomba venosa plantar, activada durante la marcha, favorece el retorno sanguíneo, evidenciando que el pie también cumple funciones sistémicas más allá de la locomoción (Moore et al., 2018).

La microarquitectura ósea del pie revela una organización trabecular altamente especializada que responde directamente a las líneas de carga predominantes durante la bipedestación y la marcha. El hueso esponjoso del calcáneo, por ejemplo, presenta un patrón de trabéculas orientadas en direcciones que reflejan la distribución vectorial de fuerzas transmitidas desde el astrágalo hacia el suelo. Esta disposición no es estática, sino que se modifica en función de las demandas

mecánicas según el principio de adaptación funcional descrito por la Ley de Wolff. Dicho principio establece que el tejido óseo se remodela en respuesta a los estímulos de carga, incrementando su densidad en regiones sometidas a mayor estrés y reduciéndola donde las demandas disminuyen. En el pie, esta capacidad adaptativa resulta esencial para mantener integridad estructural frente a millones de ciclos de apoyo a lo largo de la vida (Neumann, 2017; Moore, Dalley, & Agur, 2018).

Desde el punto de vista histofisiológico, el cartílago articular presente en las superficies del astrágalo, calcáneo y huesos del mediopié desempeña una función crítica en la absorción de impacto y en la reducción de fricción interarticular. Este tejido hialino, avascular y aneural, depende del movimiento cíclico para su nutrición, ya que la difusión de nutrientes se produce a través del líquido sinovial mediante mecanismos de compresión y descompresión. La integridad del cartílago es fundamental para preservar la congruencia articular y evitar procesos degenerativos tempranos. Alteraciones en la alineación biomecánica pueden modificar las presiones de contacto y predisponer al desgaste progresivo de estas superficies (Kapandji, 2019).

La fascia plantar, además de su función mecánica en el mantenimiento del arco longitudinal medial, presenta propiedades viscoelásticas que le permiten almacenar energía durante la fase de carga y liberarla en la fase propulsiva. Este comportamiento elástico reduce el costo metabólico de la marcha, funcionando como un sistema de reciclaje energético biológico. Estudios biomecánicos han demostrado que el mecanismo de “windlass” incrementa la rigidez del mediopié cuando el hallux entra en dorsiflexión, transformando al pie en una palanca eficiente para la transmisión de fuerzas hacia adelante. Este fenómeno ilustra la interacción entre estructura pasiva y función dinámica (Neumann, 2017).

La integración del pie dentro de la cadena cinética cerrada implica que cualquier alteración distal puede generar repercusiones proximales. Durante la fase de apoyo, la pronación controlada del retropié permite la rotación interna fisiológica de la tibia, fenómeno necesario para la absorción de impacto. Sin embargo, una pronación excesiva o insuficiente puede modificar la mecánica rotacional de rodilla y cadera, alterando patrones de carga y aumentando el riesgo de lesiones

ascendentes. Por ello, el pie debe entenderse como el primer eslabón funcional de un sistema biomecánico interconectado (Hall & Brody, 2019).

El sistema neuromuscular del pie posee una capacidad adaptativa notable gracias a la interacción entre receptores cutáneos, husos musculares y órganos tendinosos de Golgi. Estos componentes sensoriales permiten ajustes reflejos inmediatos ante cambios inesperados del terreno. La activación anticipatoria de la musculatura intrínseca durante tareas de equilibrio demuestra que el control postural depende en gran medida de la información plantar. En este sentido, el pie no solo actúa como soporte mecánico, sino como un órgano sensorial que contribuye activamente al control motor fino y a la estabilidad global (Hall & Brody, 2019).

Desde una perspectiva biomecánica avanzada, el comportamiento del pie durante la marcha puede analizarse en términos de rigidez variable. En el contacto inicial, el pie actúa como una estructura flexible que disipa energía mediante la pronación subtalar y la adaptación del mediopié. A medida que el cuerpo avanza hacia la fase terminal de apoyo, la tensión fascial y la activación muscular convierten al pie en una unidad rígida capaz de transmitir fuerzas propulsivas con mínima pérdida energética. Esta transición controlada entre flexibilidad y rigidez constituye una de las características más sofisticadas de la locomoción humana (Neumann, 2017).

La interacción entre musculatura extrínseca e intrínseca es fundamental para el mantenimiento dinámico del arco plantar. El tibial posterior, considerado uno de los principales estabilizadores del arco medial, actúa en sinergia con los músculos flexores profundos para contrarrestar fuerzas pronadoras excesivas. Simultáneamente, la musculatura intrínseca ajusta finamente la posición de los metatarsianos y falanges, contribuyendo a la distribución homogénea de presiones plantares. Esta cooperación funcional evidencia que la estabilidad del pie depende tanto de mecanismos pasivos como activos (Kapandji, 2019).

La biomecánica plantar también se relaciona estrechamente con la economía energética del desplazamiento. Investigaciones en análisis de marcha han

demostrado que el arco longitudinal medial contribuye al almacenamiento de energía elástica durante la fase de carga, reduciendo el trabajo muscular necesario en la fase de impulso. La eficiencia mecánica del pie humano es una adaptación evolutiva que permitió la bipedestación prolongada y la locomoción a larga distancia, características distintivas de la especie humana (Neumann, 2017).

La integración vascular y linfática del pie garantiza la homeostasis tisular frente a cargas repetidas. La denominada “bomba plantar” facilita el retorno venoso mediante la compresión de plexos venosos durante el apoyo, contribuyendo a la circulación sistémica. Este mecanismo demuestra que la función del pie trasciende la locomoción, participando en procesos hemodinámicos relevantes. La inmovilidad prolongada, por el contrario, puede comprometer este sistema y generar alteraciones circulatorias periféricas (Moore et al., 2018).

En conjunto, la anatomía y fisiología del pie humano revelan una integración multidimensional entre estructuras óseas, ligamentarias, musculares, neurológicas y vasculares que operan como un sistema coordinado de alta precisión. Su diseño permite absorber impacto, adaptarse a superficies variables, almacenar y liberar energía, y mantener equilibrio postural en condiciones dinámicas. Comprender esta complejidad es indispensable para analizar las implicaciones del desarrollo infantil, las adaptaciones ante cargas externas y las consecuencias de intervenciones mecánicas que puedan alterar su maduración estructural y funcional.

Etapas del crecimiento óseo y muscular del pie

El crecimiento del pie humano es un proceso dinámico, altamente regulado y dependiente de interacciones complejas entre genética, endocrinología, nutrición y estímulos mecánicos. Desde la etapa embrionaria, el desarrollo del pie se inicia como una condensación mesenquimática derivada del mesoderma lateral, que posteriormente se diferencia en estructuras cartilaginosas mediante procesos de condrogénesis regulados por señales moleculares específicas como Sox9 y factores de crecimiento fibroblástico. Esta fase cartilaginosa inicial es crucial porque establece el molde estructural sobre el cual se producirá la osificación endocondral, mecanismo mediante el cual el cartílago es progresivamente

reemplazado por tejido óseo mineralizado. La precisión de este proceso determina la alineación tridimensional de los segmentos del retropié, mediopié y antepié, influyendo directamente en la futura biomecánica locomotora (Moore, Persaud, & Torchia, 2020).

Al nacimiento, el pie presenta una configuración predominantemente cartilaginosa, con centros de osificación primarios visibles únicamente en algunos huesos como el calcáneo y el astrágalo. La mayoría de los huesos tarsales aún no están completamente osificados, lo que confiere al pie neonatal una flexibilidad considerable. Esta plasticidad estructural permite adaptaciones tempranas, pero también implica vulnerabilidad ante fuerzas externas excesivas. La almohadilla adiposa plantar, característica en esta etapa, cumple una función protectora y amortiguadora, ocultando la presencia incipiente del arco plantar. Este estado no debe confundirse con patología, ya que constituye una fase fisiológica normal del desarrollo (Sarrafian & Kelikian, 2011).

Durante los primeros dos años de vida, el crecimiento longitudinal del pie es acelerado y proporcionalmente mayor que en etapas posteriores. Este crecimiento está mediado por la actividad de las placas epifisarias, donde la proliferación condrocitaria y su posterior hipertrofia permiten la elongación ósea. La hormona del crecimiento, junto con el factor de crecimiento similar a la insulina tipo 1 (IGF-1), regula este proceso estimulando la síntesis proteica y la expansión de la matriz extracelular. Alteraciones endocrinas en esta etapa pueden repercutir en discrepancias de longitud o deformidades estructurales (Hall & Brody, 2019).

La adquisición de la bipedestación representa un hito biomecánico determinante en la remodelación estructural del pie infantil. Cuando el niño comienza a ponerse de pie y a caminar, las cargas compresivas estimulan la reorganización trabecular interna de los huesos mediante mecanismos de mecanotransducción. Los osteocitos, al detectar cambios en el estrés mecánico, modulan la actividad de osteoblastos y osteoclastos, promoviendo la adaptación estructural acorde con la Ley de Wolff. Esta remodelación progresiva fortalece el calcáneo y los metatarsianos, preparándolos para soportar cargas repetitivas (Neumann, 2017).

Entre los dos y cinco años, el pie continúa experimentando cambios morfológicos significativos. El navicular, uno de los últimos huesos en osificarse, adquiere progresivamente consistencia estructural, permitiendo mayor estabilidad en el mediopié. La consolidación de la articulación talonavicular es clave para la formación del arco longitudinal medial. En esta etapa, aunque el arco aún puede no ser visible externamente, internamente se observan ajustes ligamentarios y musculares que preparan al pie para configuraciones biomecánicas más maduras (Sarrafian & Kelikian, 2011).

El desarrollo muscular acompaña estrechamente el crecimiento óseo. La musculatura intrínseca del pie, inicialmente hipotónica, comienza a activarse con mayor intensidad a medida que el niño explora su entorno mediante el juego activo. Esta activación repetida favorece la hipertrofia progresiva y mejora la coordinación neuromuscular. La estimulación propioceptiva derivada de superficies variadas es fundamental para fortalecer estos músculos estabilizadores profundos, esenciales en el mantenimiento dinámico del arco plantar (Hall & Brody, 2019).

Durante la niñez media, aproximadamente entre los seis y diez años, se observa una disminución gradual de la laxitud ligamentosa fisiológica. El tejido conectivo incrementa su contenido de colágeno tipo I y mejora su organización fibrilar, aumentando su resistencia tensil. Este proceso fortalece la estabilidad pasiva del pie, reduciendo la dependencia exclusiva de la musculatura para mantener la alineación estructural.

El crecimiento óseo no es uniforme entre los diferentes segmentos del pie. Los metatarsianos presentan variaciones en sus velocidades de crecimiento, lo que puede generar discrepancias temporales en la distribución de cargas plantares. Estas diferencias deben interpretarse dentro del contexto del desarrollo normal, evitando diagnósticos prematuros de alteraciones estructurales.

a adolescencia introduce un segundo pico de crecimiento influenciado por hormonas sexuales como estrógenos y testosterona. Este aumento hormonal acelera la proliferación condrocitaria en las placas epifisarias, incrementando la longitud del pie antes del cierre definitivo de las epífisis. La coordinación entre

crecimiento óseo y adaptación muscular es crítica en esta fase para evitar desbalances biomecánicos transitorios (Neumann, 2017).

La densidad mineral ósea aumenta progresivamente durante la infancia y adolescencia, alcanzando su máximo alrededor del final del crecimiento esquelético. La actividad física regular desempeña un papel determinante en este proceso, estimulando la mineralización y fortaleciendo la arquitectura trabecular.

El cartílago de crecimiento es particularmente susceptible a microtraumatismos repetitivos. Cargas excesivas pueden alterar la organización columnar de condrocitos, generando desviaciones angulares o alteraciones en la alineación metatarsiana (Sarrafian & Kelikian, 2011).

La fascia plantar, durante el crecimiento infantil y adolescente, experimenta modificaciones progresivas en su composición estructural y organización fibrilar que repercuten directamente en su comportamiento biomecánico. Inicialmente, el tejido fascial presenta una mayor proporción de colágeno tipo III, asociado a mayor elasticidad y menor rigidez tensil; sin embargo, con el avance de la edad se incrementa la presencia de colágeno tipo I, caracterizado por mayor resistencia mecánica y capacidad de soportar tensiones prolongadas. Este proceso de maduración fascial no ocurre de manera aislada, sino en estrecha relación con el incremento de cargas derivadas de la actividad física y la consolidación de la marcha madura. La adaptación viscoelástica progresiva de la fascia plantar permite optimizar el mecanismo de almacenamiento y liberación de energía durante la locomoción, reduciendo el gasto metabólico y mejorando la eficiencia mecánica global del pie. Alteraciones en esta transición estructural pueden influir en la capacidad del arco plantar para resistir deformaciones excesivas bajo carga repetitiva (Neumann, 2017; Kapandji, 2019).

La maduración neuromuscular del pie durante la infancia implica una reorganización compleja de circuitos motores centrales y periféricos que refinan la coordinación entre musculatura intrínseca y extrínseca. En etapas tempranas, los patrones de activación muscular son relativamente imprecisos y presentan mayor co-contracción global; sin embargo, con el desarrollo del sistema nervioso central y la repetición de experiencias motoras, se produce una especialización

funcional que permite activaciones selectivas más eficientes. Esta optimización neuromotora mejora la estabilidad dinámica del mediopié y del retropié, favoreciendo un control más fino de la pronación y supinación durante la marcha y la carrera. La integración sensoriomotora, sustentada en la retroalimentación proveniente de mecanorreceptores plantares y husos musculares, es fundamental en este proceso de refinamiento motor (Hall & Brody, 2019).

El equilibrio progresivo entre flexibilidad y rigidez estructural constituye uno de los aspectos más delicados del desarrollo del pie. En la primera infancia predomina una mayor laxitud ligamentosa, facilitando la adaptación a distintas posiciones y cargas; sin embargo, esta misma característica puede generar inestabilidad si no es compensada por una adecuada activación muscular. A medida que el tejido conectivo madura, se incrementa la rigidez pasiva, lo que reduce la dependencia exclusiva del control muscular para mantener la alineación estructural. Este balance dinámico entre componentes pasivos y activos es esencial para garantizar que el pie pueda absorber impacto sin perder eficiencia propulsiva, consolidando así una arquitectura funcionalmente competente (Sarrafian & Kelikian, 2011).

Las adaptaciones estructurales del pie en crecimiento dependen significativamente del entorno mecánico al que es expuesto. La teoría de la mecanotransducción establece que las células óseas y fibroblásticas responden a estímulos de carga modificando su actividad metabólica y estructural. En contextos donde las cargas son fisiológicas y progresivas, se promueve una organización trabecular eficiente y un fortalecimiento ligamentoso equilibrado; en cambio, cargas excesivas o inadecuadamente distribuidas pueden alterar la alineación segmentaria. La infancia, debido a su alta plasticidad tisular, representa una ventana crítica donde los estímulos mecánicos tienen un impacto determinante en la configuración morfológica definitiva (Neumann, 2017).

La plasticidad estructural del pie infantil permite, en muchos casos, la corrección espontánea de variaciones morfológicas leves, como el pie plano flexible fisiológico. Este fenómeno se explica por la capacidad adaptativa del tejido conectivo y por el fortalecimiento progresivo de la musculatura intrínseca con la actividad cotidiana. A diferencia de alteraciones rígidas estructurales, las

variaciones flexibles tienden a resolverse conforme se consolida el arco plantar y se reduce la laxitud ligamentosa. Este carácter dinámico del desarrollo subraya la importancia de diferenciar entre procesos fisiológicos y verdaderas patologías estructurales (Volpon, 1994).

El desarrollo del arco plantar longitudinal medial es un proceso multifactorial que depende de la interacción entre osificación tarsal, tensión ligamentosa y activación muscular coordinada. La cabeza del astrágalo, sostenida por el ligamento calcaneonavicular plantar, juega un papel central en la configuración del arco. A medida que el navicular completa su osificación y se fortalece la musculatura tibial posterior, se consolida progresivamente la curvatura medial. Este proceso no es lineal, sino gradual, y puede variar entre individuos según factores genéticos, hormonales y ambientales (Kapandji, 2019).

El cierre epifisario, que ocurre al final de la adolescencia, marca la culminación del crecimiento longitudinal del pie. La fusión de las placas de crecimiento implica la desaparición del potencial de elongación ósea, estabilizando definitivamente la longitud y proporciones relativas de los segmentos metatarsianos y falángicos. Antes de este cierre, las placas epifisarias constituyen zonas vulnerables a sobrecargas repetitivas que pueden alterar su organización celular. Por ello, la consideración de la edad esquelética resulta fundamental en el análisis de intervenciones mecánicas o deportivas en población en crecimiento (Sarrafian & Kelikian, 2011).

Las diferencias individuales en la velocidad y patrón de crecimiento pueden explicar variaciones morfológicas significativas entre niños de la misma edad cronológica. La edad biológica, determinada por el estado de maduración esquelética y hormonal, puede diferir considerablemente de la edad cronológica, generando asimetrías temporales en la adaptación muscular y ligamentosa. Esta variabilidad individual requiere un enfoque clínico personalizado que evite generalizaciones simplistas en la evaluación del desarrollo plantar (Hall & Brody, 2019).

En síntesis, la ampliación del análisis del crecimiento óseo y muscular del pie revela un proceso profundamente integrado, en el cual histología, endocrinología, biomecánica y neurodesarrollo interactúan de manera

coordinada para configurar la arquitectura definitiva del pie adulto. La plasticidad estructural característica de la infancia constituye una ventaja adaptativa, pero también implica susceptibilidad ante estímulos mecánicos inapropiados. Comprender esta complejidad permite fundamentar decisiones preventivas y terapéuticas basadas en la biología del desarrollo, garantizando que la maduración estructural y funcional del pie se produzca en condiciones óptimas (Moore et al., 2020; Neumann, 2017).

Formación del arco plantar y sus implicaciones biomecánicas y clínicas

La formación del arco plantar constituye uno de los procesos estructurales más complejos y funcionalmente determinantes en el desarrollo del pie humano, ya que representa la base arquitectónica que permite la transición entre flexibilidad adaptativa y rigidez propulsiva durante la locomoción. El arco plantar no es una estructura aislada ni exclusivamente ósea; por el contrario, se trata de un sistema tridimensional integrado por componentes óseos, ligamentarios, fasciales y musculares que actúan de manera sinérgica. Desde una perspectiva biomecánica, el arco longitudinal medial es el más relevante, debido a su participación directa en la absorción de impacto y en el almacenamiento elástico de energía. Su configuración depende de la interacción entre el calcáneo, el astrágalo, el navicular, los cuneiformes y el primer metatarsiano, cuya alineación precisa determina la curvatura medial característica del pie humano (Kapandji, 2019; Neumann, 2017).

En etapas tempranas del desarrollo, el arco plantar no es clínicamente visible debido a la presencia de un cojín adiposo plantar y a la laxitud ligamentosa fisiológica. Sin embargo, desde el punto de vista estructural interno, la disposición ósea ya comienza a configurarse progresivamente conforme avanza la osificación tarsal. La cabeza del astrágalo desempeña un papel central en este proceso, actuando como vértice superior del arco medial. El ligamento calcaneonavicular plantar (ligamento resorte) sostiene esta cabeza astragalina e impide su descenso excesivo bajo carga. La consolidación progresiva de este complejo ligamentario resulta esencial para la formación estable del arco (Sarrafián & Kelikian, 2011).

La formación del arco plantar está influenciada por la Ley de Wolff y por principios de mecanotransducción que regulan la remodelación ósea en respuesta a cargas funcionales. Durante la adquisición de la marcha, las fuerzas compresivas y tensionales estimulan la reorganización trabecular en calcáneo y metatarsianos, favoreciendo una arquitectura interna que soporta la curvatura medial. Este proceso no es puramente pasivo; depende del equilibrio entre carga mecánica fisiológica y plasticidad tisular propia de la infancia. La ausencia de estímulos adecuados o la presencia de cargas excesivas pueden modificar esta adaptación estructural (Neumann, 2017).

Desde el punto de vista fascial, la fascia plantar cumple un rol determinante en la consolidación del arco longitudinal medial. Su comportamiento viscoelástico permite actuar como un tirante inferior que mantiene la curvatura bajo carga. El denominado mecanismo de “windlass” describe cómo la dorsiflexión del hallux durante la fase propulsiva tensa la fascia, elevando el arco y transformando el pie en una palanca rígida eficiente. Este fenómeno demuestra que la formación del arco no solo depende de la estructura estática, sino también de la activación dinámica durante el movimiento (Kapandji, 2019).

La musculatura intrínseca del pie, particularmente los músculos interóseos y el flexor corto de los dedos, contribuye activamente a la estabilización dinámica del arco. Aunque su tamaño es reducido, su activación coordinada regula la posición de las cabezas metatarsianas y limita la caída medial excesiva. La musculatura extrínseca, especialmente el tibial posterior, actúa como soporte dinámico adicional del arco medial. La insuficiencia funcional de este músculo se asocia clínicamente con colapso progresivo del arco en etapas posteriores de la vida (Hall & Brody, 2019).

El arco plantar no solo posee un componente longitudinal medial; también incluye un arco longitudinal lateral y un arco transversal anterior y posterior. El arco lateral, formado por calcáneo, cuboides y cuarto y quinto metatarsianos, es más bajo y rígido, funcionando como estructura de soporte primario. El arco transversal, por su parte, contribuye a la distribución homogénea de cargas entre los radios metatarsianos. La interacción tridimensional entre estos arcos garantiza estabilidad y adaptabilidad simultáneas (Neumann, 2017).

Desde una perspectiva biomecánica avanzada, el arco plantar actúa como un sistema de resorte biológico que almacena energía durante la fase de apoyo y la libera en la fase de despegue. Estudios de análisis de marcha han demostrado que esta capacidad de almacenamiento elástico reduce el trabajo muscular necesario en cada ciclo de paso, mejorando la economía energética global. La eficiencia del arco plantar representa una adaptación evolutiva que permitió la locomoción bípeda prolongada (Neumann, 2017).

Clínicamente, la ausencia aparente del arco en la infancia suele corresponder a un pie plano flexible fisiológico. Esta condición se caracteriza por la presencia de arco en descarga y su desaparición bajo carga, reflejando laxitud ligamentosa normal. En la mayoría de los casos, el arco se desarrolla progresivamente hasta la niñez media sin intervención terapéutica. Diferenciar entre pie plano flexible y pie plano rígido es fundamental para evitar intervenciones innecesarias (Volpon, 1994).

El pie plano rígido, en contraste, puede asociarse a alteraciones estructurales como coaliciones tarsales o deformidades óseas congénitas. En estos casos, la formación del arco está comprometida por limitaciones estructurales que impiden la movilidad normal del mediopié. El diagnóstico diferencial requiere evaluación clínica cuidadosa y, en ocasiones, estudios de imagen para identificar fusiones óseas o anomalías articulares (Sarrafián & Kelikian, 2011).

El colapso excesivo del arco medial altera la biomecánica de la cadena cinética inferior. La pronación sostenida puede inducir rotación interna tibial excesiva, afectando la alineación de rodilla y cadera. Este fenómeno subraya que las implicaciones clínicas del arco plantar trascienden el pie, impactando la mecánica global del miembro inferior (Hall & Brody, 2019).

Desde una perspectiva morfofuncional avanzada, la consolidación del arco plantar medial durante la infancia tardía constituye un fenómeno de integración estructural en el que convergen factores óseos, ligamentarios, musculares y neurosensoriales. La osificación progresiva del navicular —que suele completarse hacia los 3–5 años— representa un punto crítico en la definición radiográfica del arco, ya que este hueso actúa como piedra angular del sistema medial al articular con el talus proximalmente y con los cuneiformes distalmente.

La maduración del cartílago articular, la orientación trabecular interna y la alineación del eje talonavicular determinan la capacidad de la bóveda plantar para resistir cargas compresivas sin colapsar. Simultáneamente, el fortalecimiento del músculo tibial posterior incrementa su capacidad de sostén dinámico, actuando como vector estabilizador en la fase de apoyo medio de la marcha. Esta convergencia estructural explica por qué el arco no debe evaluarse únicamente en estática, sino como una arquitectura adaptable sometida a fuerzas multidireccionales (Sarrafian, 2011; Neumann, 2017).

El análisis biomecánico tridimensional del arco plantar revela que su comportamiento no puede reducirse a un simple modelo de arco pasivo, sino que responde a un sistema de tenseguridad biológica en el que estructuras rígidas (huesos) y tensiles (fascia, ligamentos y músculos) interactúan de forma sinérgica. Durante la marcha infantil, el incremento gradual de la rigidez del arco se correlaciona con la mejora en la eficiencia mecánica, disminuyendo el costo energético del desplazamiento. Estudios cinemáticos demuestran que el patrón de pronación fisiológica en la primera infancia permite la absorción óptima de impactos, pero su persistencia más allá de los 8–10 años puede asociarse con alteraciones del control neuromuscular y retrasos en la estabilización medial. Este proceso adaptativo confirma que la aparente “planitud” temprana no constituye necesariamente una patología, sino una fase evolutiva funcional (Bouchard & Tetreault, 2018).

En términos clínicos, la diferenciación entre pie plano flexible y pie plano rígido adquiere relevancia diagnóstica en el contexto del desarrollo del arco. El pie plano flexible, caracterizado por la restauración del arco en descarga o en puntillas, suele asociarse a laxitud ligamentaria generalizada y a inmadurez muscular transitoria. Por el contrario, el pie plano rígido puede relacionarse con coaliciones tarsales, alteraciones congénitas o trastornos neuromusculares. El análisis clínico debe integrar pruebas dinámicas, evaluación baropodométrica y estudios radiográficos cuando sea necesario, evitando sobrediagnósticos que conduzcan a intervenciones innecesarias. La literatura contemporánea enfatiza la importancia de un abordaje conservador basado en fortalecimiento intrínseco y educación postural (Evans, 2014).

La fascia plantar desempeña un papel central en la consolidación del arco mediante el denominado mecanismo de “windlass”, descrito originalmente por Hicks. Durante la dorsiflexión de los dedos en la fase propulsiva, la tensión fascial incrementa la rigidez del arco, transformando el pie en una palanca eficiente para la propulsión. En la infancia, la elasticidad fascial es mayor, lo que favorece la adaptabilidad, pero también implica menor estabilidad pasiva. La maduración colágena progresiva aumenta la resistencia tensil, optimizando la función elástica y reduciendo el riesgo de microcolapsos repetitivos. Esta evolución estructural confirma que la rigidez funcional del arco es el resultado de un equilibrio entre flexibilidad y control neuromuscular (Neumann, 2017).

Desde la perspectiva de la cinética de la marcha, la formación adecuada del arco plantar influye directamente en la transmisión de fuerzas hacia la tibia, la rodilla y la cadera. Un arco insuficientemente estabilizado incrementa el momento pronador y favorece la rotación interna tibial excesiva, lo cual puede alterar la alineación femoropatelar y aumentar el estrés sobre la articulación patelofemoral. En niños físicamente activos, estas alteraciones pueden manifestarse como dolor anterior de rodilla o fatiga precoz. La integración entre estabilidad plantar y alineación proximal demuestra que el arco no actúa de forma aislada, sino como componente de una cadena cinética ascendente.

La interacción entre genética y entorno también influye en la configuración definitiva del arco plantar. Estudios poblacionales han evidenciado variaciones morfológicas relacionadas con antecedentes familiares, composición del tejido conectivo y patrones culturales de uso del calzado. La exposición temprana a superficies irregulares y el estímulo sensorial plantar parecen favorecer el desarrollo muscular intrínseco y la estabilidad medial. Por el contrario, la utilización prolongada de calzado excesivamente rígido podría limitar la activación neuromuscular, retrasando la consolidación funcional del arco. Este enfoque ecológico sugiere que el desarrollo plantar es un proceso adaptativo dependiente del contexto (Bouchard & Tetreault, 2018).

En el ámbito preventivo, la educación dirigida a padres y profesionales de la salud debe centrarse en distinguir entre variaciones fisiológicas del desarrollo y verdaderas patologías estructurales. La evaluación periódica del patrón de

marcha, la simetría del apoyo y la resistencia muscular resulta más relevante que la simple observación estática del arco. Intervenciones como ejercicios de fortalecimiento de los músculos intrínsecos, actividades descalzas controladas y estímulos propioceptivos pueden contribuir a optimizar la maduración funcional sin recurrir a ortesis sistemáticas.

En contextos deportivos infantiles, la maduración incompleta del arco plantar puede aumentar la susceptibilidad a sobrecargas cuando se combinan superficies rígidas y calzado con soporte inadecuado. El incremento abrupto de volumen de entrenamiento sin una base estructural consolidada puede generar microtraumatismos repetitivos en la fascia plantar y en las estructuras mediales. La planificación progresiva del entrenamiento, respetando la edad biológica y la fase de crecimiento, constituye un principio esencial para prevenir alteraciones biomecánicas secundarias.

Desde el punto de vista radiológico, la valoración del ángulo calcáneo, el ángulo talo–primer metatarsiano y la alineación del eje talonavicular permiten cuantificar la evolución estructural del arco plantar. Sin embargo, la interpretación de estas mediciones debe contextualizarse dentro de parámetros etarios específicos, ya que los valores considerados normales en adultos no son extrapolables a la población pediátrica. Esta diferenciación metodológica evita diagnósticos erróneos y tratamientos invasivos innecesarios.

En síntesis, la formación del arco plantar constituye un proceso dinámico, multifactorial y progresivo que integra maduración ósea, consolidación ligamentaria, fortalecimiento muscular y refinamiento neuromotor. Sus implicaciones biomecánicas trascienden el ámbito local, influyendo en la eficiencia de la marcha, la distribución de cargas y la estabilidad global del miembro inferior. Desde una perspectiva clínica, comprender esta evolución permite adoptar estrategias preventivas basadas en evidencia, priorizando el acompañamiento funcional sobre la corrección precoz indiscriminada. La visión contemporánea reconoce que el arco plantar infantil no es una estructura estática a “corregir”, sino un sistema en desarrollo cuya maduración requiere estímulo, tiempo y adaptación progresiva.

Diferencias entre el pie infantil y el pie adulto: bases anatómicas, fisiológicas, biomecánicas y clínicas

El pie infantil y el pie adulto representan estadios morfofuncionales distintos dentro de un continuo evolutivo del sistema locomotor. Desde el nacimiento hasta la madurez esquelética, el pie experimenta transformaciones estructurales profundas que afectan su composición ósea, densidad mineral, organización ligamentaria, proporciones segmentarias y comportamiento biomecánico. Mientras el pie adulto constituye una estructura relativamente rígida, especializada en eficiencia mecánica y estabilidad, el pie infantil es predominantemente cartilaginoso, altamente adaptable y funcionalmente orientado a la exploración sensorial y al aprendizaje motor. Esta diferencia ontogenética implica que no pueden aplicarse criterios diagnósticos ni parámetros biomecánicos adultos al análisis pediátrico sin riesgo de error conceptual (Sarrafian, 2011).

En términos de composición tisular, el pie infantil presenta una proporción significativamente mayor de cartilago hialino en comparación con el pie adulto, donde predomina tejido óseo completamente osificado. Los centros de osificación secundarios del calcáneo, navicular, cuneiformes y bases metatarsianas emergen progresivamente durante la infancia, lo que determina variaciones temporales en la rigidez estructural. Esta condición cartilaginosa confiere mayor elasticidad y capacidad de deformación reversible frente a cargas externas, pero simultáneamente implica menor resistencia a fuerzas compresivas sostenidas. En contraste, el pie adulto posee una arquitectura trabecular consolidada que optimiza la distribución de cargas verticales y torsionales (Neumann, 2017).

La configuración del arco plantar constituye una de las diferencias más evidentes entre ambas etapas. En el pie infantil, el arco medial longitudinal suele estar oculto por un cojín adiposo plantar prominente y por la laxitud ligamentaria propia de la edad. Este aspecto plano fisiológico no debe confundirse con una alteración estructural. En el adulto, en cambio, el arco se encuentra completamente definido, con mayor tensión del ligamento calcaneonavicular plantar y consolidación del sistema fascial. La transición desde una bóveda flexible a una

arquitectura funcionalmente rígida ocurre de manera gradual y depende tanto de factores biológicos como ambientales (Evans, 2014).

Desde el punto de vista biomecánico, el pie infantil exhibe un patrón de apoyo caracterizado por mayor pronación fisiológica durante la marcha. Esta pronación inicial cumple una función amortiguadora y facilita la adaptación a superficies irregulares, contribuyendo al desarrollo propioceptivo. En el adulto, la pronación se encuentra más controlada y limitada temporalmente a la fase de respuesta a la carga, seguida por una rápida transición hacia la supinación para permitir la propulsión eficiente. La diferencia radica en el grado de control neuromuscular y en la madurez de los estabilizadores dinámicos.

La musculatura intrínseca del pie también presenta contrastes notables. En la infancia, los músculos plantares cortos aún se encuentran en proceso de fortalecimiento y refinamiento coordinativo. La activación electromiográfica revela patrones menos eficientes y mayor dependencia de la musculatura proximal para estabilizar el apoyo. En el adulto, la musculatura intrínseca participa activamente en el mantenimiento del arco y en la modulación fina de la presión plantar. Esta maduración muscular explica la mejora progresiva en la economía de la marcha y en la estabilidad postural con la edad.

En relación con la densidad mineral ósea, el pie adulto posee mayor contenido mineral y mayor resistencia estructural. Durante la infancia y adolescencia ocurre un incremento progresivo en la masa ósea, influenciado por la carga mecánica, la nutrición y factores hormonales. La inmadurez ósea del pie infantil implica susceptibilidad relativa a deformaciones si las cargas exceden la capacidad adaptativa. Este aspecto tiene implicaciones preventivas importantes en el ámbito deportivo y en la selección del calzado.

La alineación del retropié y antepié también difiere significativamente. En el niño pequeño es frecuente observar un valgo calcáneo leve asociado a la laxitud ligamentaria. Este alineamiento suele corregirse espontáneamente con la maduración muscular. En el adulto, la alineación está más definida y las desviaciones persistentes suelen reflejar alteraciones estructurales establecidas. Comprender esta diferencia evita diagnósticos prematuros de deformidades en población pediátrica.

Desde la perspectiva sensorial, el pie infantil posee alta plasticidad neuropropioceptiva. La abundancia de estímulos táctiles durante la marcha descalza favorece la integración sensoriomotora y la construcción del esquema corporal. En el adulto, aunque la sensibilidad plantar sigue siendo relevante, el sistema ya ha alcanzado patrones estabilizados de control postural. Esta plasticidad temprana convierte al pie infantil en una estructura en aprendizaje constante.

El patrón de crecimiento longitudinal también distingue ambas etapas. El pie infantil crece en longitud y anchura de manera no lineal, con periodos de aceleración coincidentes con los picos de crecimiento general. En el adulto, el tamaño permanece relativamente estable, salvo cambios degenerativos asociados al envejecimiento. Estas variaciones obligan a reevaluar periódicamente la adecuación del calzado durante la infancia.

Clínicamente, el dolor en el pie infantil suele relacionarse con procesos transitorios de crecimiento, como apofisitis calcánea, mientras que en el adulto se asocia con mayor frecuencia a sobrecargas crónicas, fascitis plantar o degeneración articular. Las etiologías reflejan la diferencia en madurez estructural y en exposición acumulativa a cargas.

En términos funcionales, el pie infantil prioriza adaptabilidad sobre eficiencia mecánica. La capacidad de deformarse y recuperar su forma permite explorar múltiples patrones de movimiento. El pie adulto, por el contrario, prioriza estabilidad y economía energética, actuando como palanca rígida durante la fase propulsiva.

La respuesta a intervenciones ortopédicas también difiere. En niños, muchas variaciones morfológicas se corrigen espontáneamente con el crecimiento y fortalecimiento muscular. En adultos, las alteraciones estructurales tienden a ser más permanentes y pueden requerir intervenciones específicas.

Desde el punto de vista histológico, los ligamentos infantiles contienen mayor proporción de fibras elásticas, lo que favorece movilidad pero reduce estabilidad

pasiva. En el adulto predomina el colágeno tipo I más denso, que incrementa resistencia tensil.

El control postural global también refleja diferencias. El niño presenta mayor oscilación postural durante la bipedestación, producto de la inmadurez neuromuscular. En el adulto, la estabilidad es mayor gracias a la integración sensorial consolidada.

Las adaptaciones a la carga repetitiva difieren considerablemente. El tejido infantil responde con remodelación acelerada, mientras que el adulto muestra procesos más lentos y riesgo de microdegeneración.

En el ámbito deportivo, el pie infantil requiere programas progresivos que respeten la maduración estructural. El pie adulto tolera mayores volúmenes e intensidades gracias a su consolidación ósea y ligamentaria.

Las diferencias metabólicas también son relevantes: el tejido infantil posee mayor actividad osteoblástica, favoreciendo crecimiento y reparación rápida. En el adulto predomina el equilibrio entre formación y resorción.

Desde la perspectiva evolutiva, el pie infantil representa una etapa de configuración adaptable que prepara la estructura para las demandas mecánicas futuras. El pie adulto encarna la culminación de ese proceso adaptativo.

El envejecimiento introduce cambios adicionales que lo diferencian aún más del estado pediátrico, como pérdida de elasticidad y disminución de la almohadilla grasa plantar.

En conclusión, las diferencias entre el pie infantil y el pie adulto abarcan dimensiones anatómicas, histológicas, biomecánicas, neuromusculares y clínicas. Reconocer estas divergencias es esencial para evitar extrapolaciones inapropiadas, diseñar estrategias preventivas adecuadas y comprender que el pie infantil no es una versión incompleta del adulto, sino una estructura en desarrollo con características propias y funciones específicas dentro del proceso de maduración humana.

La siguiente tabla comparativa sintetiza, desde una perspectiva anatómica, fisiológica, biomecánica y clínica, las diferencias fundamentales entre el pie infantil y el pie adulto, entendidos no como estructuras equivalentes en distinto tamaño, sino como configuraciones morfofuncionales pertenecientes a etapas evolutivas distintas del desarrollo humano. El pie infantil se caracteriza por su alta plasticidad tisular, predominio cartilaginoso, inmadurez neuromuscular y notable capacidad adaptativa, mientras que el pie adulto refleja la consolidación estructural, la eficiencia mecánica y la estabilidad propias de la madurez esquelética. Reconocer estas divergencias resulta esencial para evitar extrapolaciones diagnósticas inadecuadas, diseñar estrategias preventivas acordes con la edad biológica y comprender que las variaciones observadas en la infancia responden, en la mayoría de los casos, a procesos fisiológicos normales de crecimiento y no necesariamente a alteraciones patológicas.

Tabla 1. Diferencias Pie Infantil y Pie Adulto

Dimensión de análisis	Pie infantil	Pie adulto
Composición ósea	Predominio de tejido cartilaginoso; múltiples centros de osificación activos; menor densidad mineral ósea.	Osificación completa; arquitectura trabecular consolidada; mayor densidad mineral ósea.
Rigidez estructural	Alta elasticidad y capacidad de deformación reversible; menor rigidez mecánica.	Mayor rigidez estructural; optimización para soporte de carga sostenida.
Arco plantar medial	Puede parecer plano fisiológicamente; arco en formación; presencia de cojín adiposo plantar prominente.	Arco plantar completamente definido; menor tejido adiposo plantar; estabilidad ligamentaria consolidada.
Laxitud ligamentaria	Mayor elasticidad ligamentaria; predominio de fibras elásticas; mayor movilidad articular.	Ligamentos más densos con predominio de colágeno tipo I; mayor estabilidad pasiva.
Musculatura intrínseca	En proceso de fortalecimiento y maduración neuromuscular; menor eficiencia electromiográfica.	Musculatura intrínseca desarrollada; mayor participación en estabilidad y control del arco.
Patrón de marcha	Mayor pronación fisiológica durante la fase de apoyo; patrón más adaptable y variable.	Pronación controlada seguida de supinación eficiente para propulsión.

Control postural	Mayor oscilación postural; sistema neuromotor en desarrollo.	Mayor estabilidad postural; integración sensorial madura.
Respuesta a la carga	Mayor capacidad de remodelación ósea; susceptibilidad a deformaciones si hay sobrecarga excesiva.	Mayor tolerancia a cargas repetitivas; riesgo de degeneración por sobreuso crónico.
Crecimiento longitudinal	Crecimiento rápido y no lineal; cambios frecuentes en tamaño y proporciones.	Tamaño estable tras la madurez esquelética.
Tejido adiposo plantar	Almohadilla grasa gruesa que oculta el arco y mejora amortiguación.	Almohadilla más delgada; función amortiguadora más dependiente del arco estructural.
Alineación del retropié	Valgo fisiológico leve frecuente; corrección progresiva con la edad.	Alineación definida; desviaciones suelen ser estructurales.
Plasticidad neurosensorial	Alta plasticidad propioceptiva; fase crítica de aprendizaje sensoriomotor.	Plasticidad reducida; patrones de control ya establecidos.
Capacidad adaptativa	Alta adaptabilidad a superficies irregulares y estímulos externos.	Adaptabilidad menor pero mayor eficiencia mecánica.
Susceptibilidad clínica	Frecuentes condiciones transitorias de crecimiento (ej. apofisitis).	Patologías por sobreuso o degenerativas (ej. fascitis plantar).
Respuesta a ortesis	Muchas variaciones se corrigen espontáneamente con maduración.	Alteraciones estructurales suelen requerir intervenciones más específicas.
Metabolismo óseo	Alta actividad osteoblástica; crecimiento activo.	Equilibrio entre formación y resorción ósea.
Función biomecánica principal	Adaptación, exploración y aprendizaje motor.	Estabilidad, eficiencia y propulsión optimizada.
Tolerancia deportiva	Requiere progresión gradual según edad biológica.	Mayor capacidad para cargas intensas y repetitivas.
Riesgo ante calzado inadecuado	Puede influir en desarrollo estructural si es rígido o restrictivo.	Impacta principalmente en comodidad y distribución de carga.
Estado evolutivo	Sistema en desarrollo dinámico.	Sistema estructuralmente consolidado.

En conjunto, las diferencias expuestas evidencian que el pie infantil constituye un sistema en desarrollo dinámico cuya función prioritaria es la adaptación progresiva a las demandas mecánicas y sensoriomotoras del entorno, mientras

que el pie adulto representa la culminación de ese proceso adaptativo, orientado hacia la eficiencia estructural y la estabilidad funcional. Esta distinción tiene implicaciones directas en la práctica clínica, la prescripción de actividad física, la selección del calzado y la interpretación de hallazgos biomecánicos. Comprender el carácter evolutivo del pie permite fundamentar decisiones terapéuticas basadas en la evidencia, respetando los tiempos biológicos de maduración y promoviendo un desarrollo saludable que favorezca la funcionalidad a largo plazo.



CAPITULO II

BIOMECAÁNICA DEL MOVIMIENTO



Cómo caminan y corren los niños

La marcha infantil constituye un sistema dinámico en permanente reorganización, cuyo análisis exige una comprensión integradora de los procesos neurológicos, musculoesqueléticos y contextuales que intervienen en la adquisición del patrón locomotor. Desde una perspectiva del desarrollo, la locomoción no emerge como una simple maduración lineal, sino como el resultado de la interacción entre múltiples subsistemas que se autoorganizan frente a las demandas del entorno (Adolph & Hoch, 2019). En los primeros pasos independientes, el niño adopta una base de sustentación amplia, incremento del tiempo en doble apoyo y una estrategia de estabilización proximal dominante, lo que evidencia que la prioridad funcional inicial es la estabilidad postural antes que la eficiencia mecánica. Esta configuración responde a la necesidad de compensar la inmadurez del control neuromuscular distal y la limitada capacidad de anticipación postural.

El papel de los generadores centrales de patrones (CPG) espinales en la locomoción infantil ha sido ampliamente reconocido como un componente basal del ritmo alternante flexión-extensión de los miembros inferiores; sin embargo, su expresión funcional depende de la modulación suprasegmentaria proveniente de corteza motora, ganglios basales y cerebelo (Clark & Metcalfe, 2002). Durante los primeros años de vida, la mielinización progresiva de las vías corticoespinales permite mayor precisión en el reclutamiento motor y disminución de la co-contracción innecesaria. Este proceso explica la transición desde un patrón rígido e ineficiente hacia una marcha más fluida, con mejor sincronización intersegmentaria y reducción del costo energético relativo.

Cinemáticamente, la marcha temprana se caracteriza por contacto plantar plano en lugar de talonamiento definido, menor extensión de cadera en fase terminal y limitada dorsiflexión controlada en el apoyo inicial. Hallemans et al. (2006) demostraron que durante el primer año de marcha independiente se producen cambios significativos en los momentos articulares del tobillo y la rodilla, evidenciando que la producción de fuerza plantarflexora aumenta conforme se fortalece el tríceps sural y mejora la coordinación intermuscular. Esta evolución

refleja no solo crecimiento muscular, sino reorganización neural que optimiza la temporización del patrón locomotor.

Desde el punto de vista cinético, la fuerza de reacción del suelo en la marcha infantil presenta menor pico vertical inicial comparado con el adulto, lo que sugiere una estrategia de amortiguación basada en mayor flexión de rodilla y activación simultánea de musculatura antagonista. Esta estrategia aumenta la estabilidad articular pero incrementa el gasto energético por mayor trabajo muscular activo. La eficiencia mecánica, por tanto, no es una característica innata del patrón infantil, sino un resultado emergente del fortalecimiento muscular y la optimización neuromotora progresiva (Adolph & Hoch, 2019).

La carrera infantil representa un salto cualitativo en la organización motora, dado que implica la presencia de una fase aérea sostenida y una mayor exigencia en el ciclo de estiramiento-acortamiento. Lieberman (2012) sostiene que la economía de carrera depende en gran medida de la capacidad de almacenar y liberar energía elástica en el tendón de Aquiles y la fascia plantar; sin embargo, en el niño estas estructuras aún presentan menor rigidez y menor capacidad de reutilización elástica. En consecuencia, la carrera temprana depende más del trabajo muscular activo que del almacenamiento pasivo de energía, lo que explica su mayor costo metabólico relativo.

El desarrollo de la coordinación brazo-pierna constituye un componente esencial para la estabilización rotacional del tronco durante la locomoción. En etapas iniciales, los miembros superiores permanecen en abducción moderada con escasa oscilación recíproca, lo cual refleja una estrategia de equilibrio más que de propulsión. A medida que madura el control central, los brazos adoptan un patrón alternante coordinado con las piernas, reduciendo el momento angular del tronco y mejorando la eficiencia global del desplazamiento (Clark & Metcalfe, 2002).

El control postural dinámico en la marcha infantil depende de la integración multisensorial. Barela (2013) destaca que en edades tempranas existe predominio de la información visual para regular el equilibrio, mientras que la propiocepción y el sistema vestibular adquieren mayor protagonismo con la maduración. Esta transición explica la inestabilidad observada cuando el niño

enfrenta superficies irregulares o condiciones sensoriales desafiantes. El aprendizaje locomotor, por tanto, no es exclusivamente muscular, sino una reorganización perceptivo-motora integral.

La variabilidad en la marcha infantil debe interpretarse como un indicador de exploración adaptativa más que como un signo de deficiencia. Desde la teoría de sistemas dinámicos, la variabilidad funcional permite al sistema motor identificar soluciones óptimas ante diferentes demandas ambientales (Adolph & Hoch, 2019). En este sentido, la diversidad en longitud de paso, cadencia y patrón de apoyo constituye un proceso de calibración interna que favorece la plasticidad neuronal y la consolidación de patrones más eficientes.

El costo energético elevado en la locomoción infantil se relaciona con menor eficiencia mecánica y mayor activación muscular co-contráctil. Estudios metabólicos muestran que los niños consumen más oxígeno por kilogramo de masa corporal durante la marcha comparado con adultos, lo cual se asocia con menor reutilización de energía elástica y mayor necesidad de estabilización activa (Hallemans et al., 2006). Esta característica debe interpretarse como parte del proceso adaptativo y no como una limitación funcional.

El crecimiento longitudinal de los segmentos corporales durante la infancia genera modificaciones continuas en las relaciones palanca-momento de fuerza que condicionan la organización del patrón locomotor. Cada incremento en la longitud femoral o tibial altera el brazo de momento de las fuerzas musculares, modificando la magnitud del torque requerido para estabilizar y propulsar el cuerpo en el plano sagital. Desde una perspectiva biomecánica, el aumento de la longitud segmentaria incrementa el momento de inercia, lo que exige mayor control neuromuscular para regular la oscilación pendular de los miembros inferiores. Esta situación obliga al sistema nervioso central a recalibrar constantemente los parámetros temporoespaciales de la marcha, fenómeno que explica los periodos transitorios de torpeza observados durante los picos de crecimiento acelerado. Clark y Metcalfe (2002) describen este proceso como una reorganización dinámica donde cada nueva configuración corporal requiere ajustes motores adaptativos antes de alcanzar nuevamente estabilidad

funcional. En consecuencia, la marcha infantil no es estática, sino un patrón en permanente reconstrucción estructural y neural.

a relación entre fuerza muscular relativa y masa corporal constituye otro determinante crítico en la calidad del desplazamiento infantil. Durante determinadas etapas del desarrollo, el incremento en masa corporal puede superar temporalmente la capacidad de producción de fuerza muscular, especialmente en extensores de cadera y tobillo, generando estrategias compensatorias basadas en mayor tiempo de apoyo y reducción de longitud de paso. Mickle et al. (2008) evidenciaron que el aumento del índice de masa corporal se asocia con modificaciones en la presión plantar y cambios cinemáticos que reflejan una adaptación para disminuir el estrés mecánico sobre las estructuras en crecimiento. Desde el punto de vista fisiológico, esta situación implica una mayor activación muscular co-contráctil para estabilizar articulaciones, lo que incrementa el gasto energético relativo y modifica la eficiencia locomotora.

La experiencia motriz acumulada actúa como modulador esencial del refinamiento locomotor. Cada episodio de desplazamiento contribuye a la consolidación de circuitos sinápticos responsables de la coordinación intermuscular y la anticipación postural. Adolph y Hoch (2019) sostienen que el desarrollo motor es dependiente de la experiencia, lo que significa que la repetición en contextos variados permite al sistema identificar soluciones óptimas ante diferentes demandas ambientales. En este sentido, caminar sobre superficies irregulares, pendientes o texturas diversas enriquece la capacidad adaptativa del patrón locomotor, fortaleciendo la plasticidad cortical y subcortical.

La evolución de la elasticidad músculo-tendinosa representa un factor determinante en la transición hacia una locomoción más eficiente. Durante la infancia temprana, los tendones presentan menor rigidez relativa, lo que limita la capacidad de almacenar energía elástica durante la fase excéntrica del apoyo. Lieberman (2012) explica que la eficiencia en la carrera adulta depende significativamente de la reutilización elástica del tendón de Aquiles; sin embargo, en el niño esta propiedad aún se encuentra en desarrollo. Conforme aumenta la rigidez tendinosa y mejora la sincronización neuromuscular, la reutilización de

energía elástica reduce el trabajo muscular activo y optimiza el costo metabólico del desplazamiento.

El control de la dorsiflexión activa durante el contacto inicial constituye un hito fundamental en la maduración del patrón de marcha. En etapas tempranas, la limitada activación excéntrica del tibial anterior impide un talonamiento definido, generando un contacto plantar más plano. Hallemans et al. (2006) observaron que la mejora progresiva en el momento dorsiflexor del tobillo se asocia con una transición hacia un patrón más eficiente de absorción de impacto. Esta modificación no solo reduce la carga articular, sino que mejora la preparación mecánica para la fase de apoyo medio y posterior propulsión.

La estabilización pélvica en el plano frontal depende del fortalecimiento progresivo del glúteo medio y de la maduración del control neuromotor lumbopélvico. En la infancia temprana es frecuente observar oscilaciones laterales amplias del tronco, producto de debilidad relativa en abductores de cadera. Con el desarrollo muscular y la integración sensoriomotora, la pelvis adquiere mayor estabilidad, reduciendo desplazamientos compensatorios y optimizando la alineación de la extremidad inferior. Esta mejora repercute directamente en la eficiencia mecánica y en la distribución homogénea de cargas articulares.

La maduración cerebelosa desempeña un papel crucial en la precisión temporal del patrón locomotor. El cerebelo regula la coordinación fina y la sincronización muscular, ajustando la secuencia de activación para minimizar errores y optimizar la fluidez del movimiento. Según Barela (2013), la consolidación del equilibrio dinámico depende en gran medida de la integración cerebelosa de información sensorial y motora. A medida que este sistema madura, disminuyen las oscilaciones innecesarias y mejora la estabilidad en condiciones de perturbación externa.

La integración sensorial refinada permite respuestas posturales automáticas más rápidas y eficientes. Durante la infancia, la dependencia visual para mantener el equilibrio es predominante; sin embargo, con la maduración aumenta la contribución propioceptiva y vestibular (Barela, 2013). Este cambio mejora la capacidad del niño para adaptarse a superficies inestables sin necesidad de

supervisión visual constante, fortaleciendo la autonomía motora y la seguridad locomotora.

La consolidación de la carrera madura implica un aumento progresivo de la rigidez funcional del miembro inferior durante la fase de apoyo, lo cual optimiza la transmisión de fuerzas verticales y horizontales. Esta rigidez no debe interpretarse como rigidez patológica, sino como una propiedad biomecánica adaptativa que permite almacenar energía elástica y mejorar la eficiencia del ciclo de estiramiento-acortamiento (Lieberman, 2012). El equilibrio entre rigidez y flexibilidad determina la capacidad de absorber impacto sin comprometer la propulsión.

Hacia finales de la niñez, la coordinación intersegmentaria y la eficiencia energética alcanzan niveles comparables a los del adulto joven. La reducción de la co-contracción innecesaria, el aumento en la reutilización elástica y la mejora en la sincronización neuromuscular permiten un patrón locomotor más económico. Adolph y Hoch (2019) enfatizan que este logro no es producto exclusivo de la maduración biológica, sino de la interacción constante entre experiencia, entorno y crecimiento estructural.

En síntesis ampliada, caminar y correr durante la infancia representan procesos emergentes donde cada ajuste biomecánico refleja una reorganización neural en respuesta al crecimiento corporal y a las demandas ambientales. La locomoción infantil debe entenderse como un sistema complejo adaptativo en el que estabilidad, eficiencia y exploración coexisten en equilibrio dinámico. La convergencia entre maduración neurológica, fortalecimiento muscular, elasticidad tendinosa e integración sensorial configura progresivamente un patrón locomotor estable y eficiente, confirmando que el desarrollo motor es un fenómeno sistémico profundamente interdependiente (Adolph & Hoch, 2019; Clark & Metcalfe, 2002).

Distribución de cargas en el pie infantil

La distribución de cargas en el pie infantil debe entenderse como un fenómeno adaptativo dinámico que refleja la interacción entre crecimiento estructural, maduración neuromuscular y experiencia motora acumulada. A diferencia del pie

adulto, cuya arquitectura ósea y ligamentosa ha alcanzado un grado elevado de estabilidad, el pie del niño presenta cartílagos de crecimiento abiertos, menor rigidez ligamentosa y una proporción significativa de tejido adiposo subcutáneo plantar que altera la forma en que las fuerzas de reacción del suelo son absorbidas y transmitidas hacia el esqueleto axial. Esta configuración genera un patrón de presión plantar más amplio y menos concentrado, particularmente en el mediopié, lo cual ha sido descrito como una característica fisiológica del desarrollo temprano (Mickle et al., 2008). Desde la perspectiva de los sistemas dinámicos, esta distribución amplia no representa deficiencia estructural, sino una estrategia transitoria de estabilización que favorece la adaptación progresiva del sistema locomotor (Adolph & Hoch, 2019).

Durante los primeros años de vida, el cojín adiposo plantar desempeña una función amortiguadora crítica, actuando como un modulador mecánico que redistribuye las presiones generadas en el contacto con el suelo. Este tejido adiposo, especialmente prominente en la región medial del pie, reduce la concentración de cargas puntuales sobre estructuras óseas aún inmaduras, protegiendo las placas de crecimiento frente a microtraumatismos repetitivos. Sin embargo, su presencia también contribuye a la apariencia clínica de pie plano fisiológico, lo que puede conducir a interpretaciones erróneas si no se comprende su carácter evolutivo. La reducción progresiva de este tejido y el aumento concomitante de la activación muscular intrínseca favorecen una redistribución más focalizada de las cargas hacia retropié y antepié en etapas posteriores (Clark & Metcalfe, 2002).

El desarrollo del arco longitudinal medial constituye uno de los cambios estructurales más relevantes en la transición hacia un patrón adulto de distribución de cargas. Este proceso no depende exclusivamente de la osificación ósea, sino de la interacción entre estructuras pasivas —ligamentos plantares, fascia plantar— y componentes activos —tibial posterior, flexor largo del hallux y musculatura intrínseca—. La activación coordinada de estas estructuras genera un soporte dinámico que eleva el arco durante la fase de apoyo medio, permitiendo que el peso corporal sea transmitido de manera eficiente desde el retropié hacia el antepié. En ausencia de estimulación

mecánica adecuada, esta activación puede ser insuficiente, prolongando la permanencia de cargas en el mediopié (Barela, 2013).

El análisis baropodométrico ha mostrado que la trayectoria del centro de presión (COP) en niños pequeños presenta mayor dispersión y menor linealidad comparado con adultos, reflejando una menor especialización en la transferencia secuencial de cargas. Esta variabilidad no debe interpretarse como disfunción, sino como parte de un proceso exploratorio donde el sistema neuromotor experimenta distintas configuraciones hasta estabilizar patrones más eficientes. Hallemans et al. (2006) observaron que los cambios en los momentos articulares del tobillo durante el primer año de marcha independiente se correlacionan con modificaciones en la trayectoria del COP, evidenciando una reorganización progresiva de la mecánica de apoyo.

La laxitud ligamentosa relativa característica de la infancia influye directamente en la capacidad del arco plantar para sostener cargas concentradas. Los ligamentos plantares, incluyendo el complejo calcáneo-navicular plantar, presentan mayor elasticidad, permitiendo mayor deformación bajo carga. Esta característica aumenta la absorción de impacto, pero también exige mayor activación muscular para evitar colapsos excesivos del arco durante la fase de apoyo. La estabilidad del pie infantil, por tanto, depende más de mecanismos activos que pasivos, lo cual resalta la importancia de la actividad física variada en la consolidación estructural (Adolph & Hoch, 2019).

El crecimiento y la osificación progresiva de los huesos del tarso modifican la geometría del pie y, con ello, la distribución de cargas plantares. El hueso navicular, cuya osificación ocurre relativamente tarde en comparación con otros huesos tarsales, desempeña un papel central en la consolidación del arco medial. Hasta que esta osificación se completa, la arquitectura del mediopié permanece más susceptible a deformaciones bajo carga. Este proceso estructural explica por qué la consolidación del arco suele observarse hacia la niñez media y no en etapas preescolares.

Desde el punto de vista cinético, la fuerza de reacción del suelo en niños presenta picos verticales menores en términos absolutos, pero proporcionalmente elevados en relación con la masa corporal y la superficie

plantar disponible. Esto implica que las estructuras del pie infantil deben gestionar fuerzas considerables con menor rigidez estructural. Halleman et al. (2006) evidenciaron que los momentos plantarflexores aumentan progresivamente con la edad, lo que sugiere una mejora en la capacidad de absorción y propulsión que repercute directamente en la redistribución de cargas hacia el antepié.

a propiocepción plantar desempeña un papel determinante en la regulación de la carga mecánica. Los mecanorreceptores cutáneos transmiten información sobre presión y deformación, permitiendo ajustes posturales inmediatos que redistribuyen el peso corporal según las características del terreno. Barela (2013) sostiene que la integración sensorial es fundamental para la estabilización dinámica; en el caso del pie infantil, esta integración facilita la modulación del arco y la alineación subtalar durante la marcha.

El impacto del índice de masa corporal sobre la presión plantar infantil ha sido ampliamente documentado. Mickle et al. (2008) encontraron que niños con mayor masa corporal presentan presiones más elevadas en mediopié y antepié medial, lo que puede incrementar el estrés sobre estructuras aún inmaduras. Esta situación resalta la necesidad de considerar la composición corporal como variable relevante en el análisis biomecánico del pie en desarrollo.

La transición hacia una distribución de cargas más especializada implica la consolidación del talonamiento en el contacto inicial y la transferencia eficiente hacia las cabezas metatarsales durante la propulsión. Este cambio refleja una mejora en la coordinación neuromuscular y en la rigidez funcional del arco plantar. Lieberman (2012) explica que la eficiencia en la transmisión de fuerzas depende de la capacidad del pie para alternar entre flexibilidad en la absorción y rigidez en la propulsión; en el niño, esta capacidad se encuentra en proceso de consolidación progresiva.

La alineación del retropié en la infancia temprana suele presentar un valgo fisiológico que forma parte del proceso normal de desarrollo. Este alineamiento favorece una mayor superficie de contacto medial durante la fase de apoyo, lo que contribuye a una distribución más amplia de la carga en el mediopié. Desde una perspectiva biomecánica, el valgo calcáneo leve permite aumentar la base

de sustentación y mejorar la estabilidad en un sistema neuromotor aún inmaduro. Sin embargo, esta configuración exige un control progresivo de la musculatura tibial posterior y del complejo peroneo para modular la pronación y evitar una sobrecarga persistente en estructuras mediales. Según Adolph y Hoch (2019), el sistema motor infantil se caracteriza por estrategias de estabilidad que posteriormente son refinadas hacia patrones más eficientes; el valgo fisiológico puede interpretarse como una de estas estrategias transitorias.

La articulación subtalar desempeña un papel central en la adaptación de cargas frente a variaciones del terreno. En el pie infantil, la mayor laxitud capsuloligamentosa permite un rango más amplio de pronación y supinación, lo que facilita la absorción de irregularidades superficiales. Esta capacidad adaptativa reduce picos de presión concentrados, distribuyendo las fuerzas de reacción del suelo en una superficie mayor. No obstante, la eficiencia de este mecanismo depende de la coordinación neuromuscular adecuada; sin control muscular suficiente, la excesiva movilidad puede generar patrones compensatorios ascendentes que afecten rodilla y cadera (Barela, 2013).

La interacción entre articulación subtalar y mediotarsiana regula la transición del pie desde una estructura flexible durante la absorción de impacto hacia una palanca rígida en la propulsión. En la infancia, esta transición aún no alcanza la eficiencia observada en el adulto debido a la menor rigidez estructural del arco. Hallems et al. (2006) evidenciaron que los momentos articulares del tobillo evolucionan progresivamente con la edad, lo que sugiere una mejora en la capacidad del pie para modular esta transición funcional. La adecuada sincronización entre flexibilidad y rigidez constituye un elemento determinante en la redistribución de cargas plantares.

La musculatura intrínseca del pie, frecuentemente subestimada en el análisis clínico, cumple un papel esencial en la estabilización dinámica del arco y en la redistribución de presiones plantares. Estos músculos actúan como tensores activos que contrarrestan la deformación pasiva inducida por la carga corporal. Lieberman (2012) destaca que la función del pie humano evolucionó para alternar entre adaptabilidad y rigidez; en el niño, la consolidación de esta

dualidad depende del fortalecimiento progresivo de la musculatura intrínseca a través de experiencias locomotoras variadas.

El desarrollo de la fuerza plantarflexora del tobillo influye directamente en la carga transmitida hacia el antepié durante la fase propulsiva. En etapas tempranas, la limitada capacidad del tríceps sural reduce el impulso final, manteniendo mayor tiempo de carga en el mediopié. Conforme aumenta la fuerza muscular y mejora la sincronización neuromuscular, la presión se desplaza hacia las cabezas metatarsales, reflejando una transición hacia un patrón más eficiente de transmisión de fuerzas (Hallemans et al., 2006).

El entorno físico y la variedad de superficies sobre las cuales el niño camina influyen significativamente en la distribución de cargas. Superficies blandas estimulan mayor activación muscular estabilizadora, mientras que superficies rígidas concentran las fuerzas de reacción en áreas específicas del pie. Desde la teoría ecológica del desarrollo motor, la interacción constante entre organismo y ambiente moldea las estrategias de apoyo plantar, promoviendo adaptaciones estructurales progresivas (Adolph & Hoch, 2019).

El proceso de osificación del navicular y otros huesos del mediopié marca un punto clave en la consolidación del arco longitudinal medial. Antes de completarse este proceso, la arquitectura del pie permanece más flexible y susceptible a deformaciones bajo carga. La remodelación ósea inducida por estímulos mecánicos graduales contribuye a la estabilización estructural del arco, siempre que las cargas no excedan la capacidad adaptativa del tejido en crecimiento.

La eficiencia en la transmisión de fuerzas plantares también depende de la alineación global de la extremidad inferior. Alteraciones en rotación tibial o anteversión femoral pueden modificar la dirección del vector de carga sobre el pie, alterando la distribución plantar. Barela (2013) señala que el control postural global influye directamente en la organización distal del apoyo, confirmando la naturaleza sistémica del desarrollo locomotor.

Conforme el niño avanza hacia la niñez media, se observa una reducción progresiva de la presión en mediopié y un incremento en retropié y antepié,

reflejando la consolidación del arco y la mejora en la función propulsiva. Mickle et al. (2008) documentaron que esta redistribución se asocia con cambios estructurales y aumento de actividad física, lo que evidencia la influencia conjunta de factores biológicos y ambientales.

En síntesis ampliada, la distribución de cargas en el pie infantil no puede interpretarse como un estado fijo, sino como un proceso adaptativo dinámico donde crecimiento, experiencia y maduración neuromuscular convergen para construir progresivamente un patrón biomecánico eficiente. La transición desde una carga amplia y medial hacia una transmisión secuencial talón–antepié refleja la consolidación del arco plantar, el fortalecimiento muscular y la integración sensorial refinada. Este proceso confirma que el pie infantil no es un pie “incompleto”, sino una estructura en transformación cuyo diseño responde a las demandas evolutivas del desarrollo humano (Adolph & Hoch, 2019; Barela, 2013; Hallemans et al., 2006; Mickle et al., 2008; Lieberman, 2012).

Impacto del calzado rígido vs. calzado flexible en el pie en desarrollo

El análisis del impacto del calzado rígido frente al calzado flexible en el pie en desarrollo exige comprender que el pie infantil constituye una estructura osteocartilaginosa en proceso de osificación progresiva, con predominio de tejido cartilaginoso y alta plasticidad adaptativa frente a cargas mecánicas externas. Durante los primeros años de vida, los centros de osificación del escafoides, los cuneiformes y la base del quinto metatarsiano aún no han completado su maduración estructural, lo cual implica que las fuerzas externas repetidas pueden influir en la modelación ósea según los principios de la ley de Wolff y de la mecanotransducción tisular. En este contexto, el calzado no es un elemento neutro: actúa como una interfase mecánica que modifica la transmisión de cargas, la información sensorial plantar y la activación muscular intrínseca, afectando potencialmente la organización funcional del arco longitudinal medial (Mickle et al., 2008; Lieberman, 2012).

El calzado rígido, definido por suelas gruesas con limitada flexión metatarsofalángica y contrafuertes estructurados, restringe el movimiento natural del antepié durante la fase de despegue. Esta limitación interfiere con el mecanismo windlass, descrito como el proceso mediante el cual la dorsiflexión

de los dedos tensiona la fascia plantar, eleva el arco longitudinal medial y transforma al pie en una palanca rígida eficiente para la propulsión. La reducción sistemática de este mecanismo puede disminuir la eficiencia mecánica del ciclo de la marcha y alterar la transferencia de energía elástica almacenada en la fascia plantar (Lieberman, 2012). Desde una perspectiva biomecánica, la interferencia externa repetida en esta dinámica podría modificar el desarrollo funcional del complejo arco-fascia-músculos intrínsecos.

Desde el punto de vista neuromuscular, la rigidez estructural del calzado puede reducir la demanda de estabilización activa por parte de la musculatura intrínseca del pie, especialmente los músculos interóseos, lumbricales y el abductor del hallux. Estos músculos cumplen un papel fundamental en el mantenimiento dinámico del arco durante la fase de apoyo monopodal. Cuando el calzado proporciona soporte pasivo excesivo, se produce una sustitución funcional que puede disminuir la activación electromiográfica repetitiva necesaria para el fortalecimiento adaptativo. Clark y Metcalfe (2002) señalan que el desarrollo motor depende de la interacción entre desafío mecánico y respuesta neuromuscular; por tanto, una reducción sistemática del desafío podría limitar la maduración funcional de estos estabilizadores profundos.

Adicionalmente, la suela rígida actúa como barrera sensorial, amortiguando la estimulación de mecanorreceptores cutáneos plantares —especialmente corpúsculos de Merkel y Ruffini— responsables de informar al sistema nervioso central sobre presión, textura y desplazamiento. Esta disminución en la retroalimentación sensorial puede alterar los ajustes posturales anticipatorios y la regulación fina del equilibrio dinámico. Barela (2013) argumenta que el control postural infantil depende críticamente de la integración multisensorial; si la entrada plantar se reduce de forma crónica, el sistema podría reorganizar sus estrategias estabilizadoras priorizando información visual o vestibular, con posibles consecuencias en la eficiencia adaptativa.

En contraste, el calzado flexible —caracterizado por suelas delgadas, alta flexión metatarsofalángica y mínima interferencia estructural— permite mayor movilidad articular y favorece patrones de apoyo más similares a la marcha descalza. Diversos estudios han demostrado que la locomoción descalza incrementa la

activación muscular intrínseca y promueve una mayor variabilidad adaptativa del centro de presión, considerada un indicador de exploración motora saludable (Adolph & Hoch, 2019). Esta variabilidad no implica inestabilidad, sino capacidad del sistema para ajustar continuamente su respuesta frente a microcambios ambientales.

La cinemática del tobillo también se ve influenciada por el tipo de calzado. El calzado rígido puede modificar el ángulo inicial de contacto y alterar el patrón de progresión tibial durante la fase de apoyo. Hallemans et al. (2006) demostraron que la evolución del momento plantarflexor del tobillo constituye un marcador clave de maduración locomotora; cualquier interferencia externa sostenida podría modificar la trayectoria normal de este proceso, especialmente en edades en las que la coordinación intersegmentaria aún está en consolidación.

La distribución de presiones plantares representa otro elemento crítico. Mickle et al. (2008) observaron que el uso de calzado estructurado puede concentrar cargas en áreas específicas del antepié, mientras que la marcha descalza o con calzado flexible favorece una distribución más homogénea. En el pie en desarrollo, donde los tejidos blandos aún presentan mayor proporción de adiposidad plantar, la distribución equilibrada de cargas podría contribuir a una modelación estructural más armónica.

Desde la perspectiva de la economía de la marcha, la rigidez excesiva puede incrementar el costo energético al alterar la sincronización entre absorción y liberación de energía elástica. La fascia plantar funciona como un resorte biológico cuya eficiencia depende de su elongación y recuperación elástica durante cada ciclo. Si la rigidez externa reduce la deformación fisiológica necesaria, la eficiencia energética podría disminuir, afectando patrones de resistencia locomotora a largo plazo (Lieberman, 2012).

La infancia constituye un período crítico de plasticidad neuromuscular. Durante esta etapa, la exposición a variabilidad motora favorece la consolidación de patrones estables y adaptativos. El calzado flexible puede actuar como facilitador de dicha variabilidad, mientras que el calzado rígido podría homogenizar excesivamente la experiencia motora. Adolph y Hoch (2019) destacan que el

desarrollo motor emerge de la interacción entre organismo, tarea y entorno; modificar sistemáticamente el entorno plantar altera este equilibrio dinámico.

Asimismo, el soporte pasivo excesivo podría influir en la percepción corporal. La propiocepción articular depende no solo de receptores ligamentarios, sino también de la interacción activa músculo-tendinosa. Si el calzado reduce la necesidad de ajustes finos, el refinamiento sensoriomotor podría verse parcialmente limitado durante etapas críticas de aprendizaje motor.

En términos estructurales, la consolidación del arco longitudinal medial no debe entenderse como un evento exclusivamente morfológico, sino como un proceso dinámico de interacción entre crecimiento óseo, maduración ligamentaria, activación muscular intrínseca y estimulación mecánica progresiva. Durante la infancia, el esqueleto del pie presenta una elevada proporción de cartílago hialino y núcleos de osificación secundarios que responden de manera sensible a los vectores de carga aplicados repetidamente. Bajo el principio de mecanotransducción, las células osteoblásticas y condrocíticas transforman estímulos mecánicos en señales bioquímicas que regulan la deposición de matriz ósea (Lieberman, 2012). En este contexto, el uso continuado de calzado rígido que redistribuye artificialmente las cargas podría modificar la orientación de las líneas de estrés, afectando la modelación estructural progresiva. En contraste, la exposición controlada a cargas fisiológicas mediante calzado flexible o períodos descalzos supervisados permitiría una estimulación más cercana al patrón evolutivamente previsto, favoreciendo una arquitectura ósea funcionalmente optimizada.

No obstante, el análisis debe incorporar una perspectiva contextual. El calzado rígido cumple una función protectora frente a superficies irregulares, temperaturas extremas o riesgos traumáticos, particularmente en entornos urbanos donde el suelo no ofrece condiciones naturales. Desde el enfoque ecológico del desarrollo motor, el entorno constituye un modulador clave del aprendizaje locomotor (Adolph & Hoch, 2019). Por tanto, la discusión no radica en la eliminación absoluta del calzado estructurado, sino en la dosificación de su uso según edad, actividad y superficie. En deportes organizados o actividades de impacto repetitivo, la protección estructural puede ser necesaria; sin embargo,

su empleo prolongado fuera de estos contextos podría reducir la variabilidad motora indispensable para la maduración adaptativa del sistema pie-tobillo.

Desde el punto de vista clínico preventivo, la prescripción de calzado infantil debería fundamentarse en una evaluación individualizada que contemple alineación calcánea, movilidad subtalar, tono muscular, patrón de marcha y antecedentes familiares de alteraciones estructurales. El pie plano flexible infantil, por ejemplo, representa en muchos casos una variante fisiológica del desarrollo más que una patología estructural. La intervención con soportes rígidos sin criterios clínicos claros podría interferir con la evolución espontánea del arco longitudinal medial. Clark y Metcalfe (2002) señalan que el desarrollo motor sigue trayectorias no lineales; intervenir prematuramente sobre variaciones normales podría alterar la autoorganización funcional del sistema.

La evidencia sugiere que la exposición intermitente a estímulos variados — incluyendo superficies con distinta textura, inclinación y rigidez— favorece la activación coordinada de la musculatura intrínseca y extrínseca del pie. Esta activación repetida contribuye al fortalecimiento de estructuras estabilizadoras profundas, tales como el tibial posterior y el flexor largo del hallux, cuya función es esencial en la estabilización del arco durante la fase de apoyo monopodal. La restricción sistemática de esta activación mediante soporte pasivo excesivo podría disminuir la adaptación neuromuscular progresiva. En términos de aprendizaje motor, la variabilidad constituye un elemento facilitador de la estabilidad funcional futura (Adolph & Hoch, 2019).

La necesidad de estudios longitudinales rigurosos resulta imperativa para establecer relaciones causales entre tipo de calzado y morfología plantar adulta. La mayoría de investigaciones disponibles presentan diseños transversales o comparativos de corto plazo. Hallemans et al. (2006) demostraron que la evolución de la dinámica articular durante los primeros meses de marcha independiente implica cambios sustanciales en momentos articulares y coordinación intersegmentaria; extrapolar estas transformaciones a largo plazo requiere seguimientos prolongados que integren análisis cinemáticos tridimensionales, estudios electromiográficos y evaluación estructural mediante imagenología.

El equilibrio entre protección y estimulación constituye el eje central en la toma de decisiones clínicas y educativas. Desde la fisiología del ejercicio terapéutico, la adaptación tisular requiere carga suficiente pero no excesiva, aplicada con progresión gradual. Un calzado demasiado flexible en contextos de alta demanda podría incrementar el riesgo de sobrecarga, mientras que uno excesivamente rígido podría disminuir la estimulación adaptativa necesaria. La prescripción debe basarse en principios de progresión, especificidad y variabilidad funcional.

En términos preventivos, la intervención temprana fundamentada en criterios biomecánicos podría reducir la incidencia de alteraciones persistentes como el pie plano flexible sintomático o la pronación excesiva prolongada. No obstante, la intervención debe orientarse a fortalecer el sistema activo más que a sustituirlo. La literatura sobre función del arco sugiere que la integridad muscular desempeña un papel determinante en la estabilidad dinámica (Mickle et al., 2008). Por consiguiente, programas complementarios de fortalecimiento intrínseco podrían resultar más apropiados que el uso indiscriminado de soportes rígidos.

El abordaje interdisciplinario resulta esencial. Pediatras, fisioterapeutas, profesionales en ciencias del movimiento y educadores físicos deben integrar criterios basados en evidencia al orientar a padres y cuidadores. Barela (2013) destaca que el control postural y locomotor depende de la integración sensorial y motora; por ello, la decisión sobre el tipo de calzado no puede reducirse a consideraciones estéticas o comerciales, sino que debe enmarcarse en una comprensión integral del desarrollo neuromotor.

Comprender el pie infantil como sistema dinámico adaptable implica reconocer que su desarrollo emerge de la interacción continua entre biología y ambiente. La teoría de sistemas dinámicos aplicada al desarrollo motor sostiene que pequeñas modificaciones en restricciones externas pueden generar cambios significativos en patrones organizativos (Adolph & Hoch, 2019). En este sentido, el calzado actúa como una restricción ambiental que puede facilitar o limitar grados de libertad articulares y musculares. Su influencia no es determinista, pero sí moduladora.

En síntesis ampliada, la evidencia biomecánica, evolutiva y neurofisiológica converge en señalar que el calzado flexible, utilizado de manera contextualizada y acompañado de exposición variada y segura a estímulos mecánicos, puede favorecer la maduración funcional del pie en desarrollo. Por el contrario, el uso prolongado e indiscriminado de calzado rígido podría modificar la activación muscular, la distribución de cargas y la integración sensorial durante etapas críticas de plasticidad estructural. La decisión óptima no radica en extremos, sino en una prescripción fundamentada en principios científicos, individualización clínica y comprensión profunda del desarrollo locomotor humano (Lieberman, 2012; Mickle et al., 2008).

La comprensión del impacto del calzado en el pie en desarrollo exige un análisis comparativo que trascienda las aproximaciones simplistas centradas únicamente en criterios de comodidad o protección. El pie infantil constituye un sistema biomecánico dinámico cuya maduración depende de la interacción constante entre carga mecánica, activación neuromuscular, estimulación sensorial y modelación estructural progresiva. En este contexto, el tipo de calzado actúa como una restricción ambiental capaz de modular la cinemática articular, la distribución de presiones plantares, la eficiencia del mecanismo windlass, la activación de la musculatura intrínseca y los procesos de mecanotransducción ósea. La siguiente tabla sintetiza de manera exhaustiva las diferencias biomecánicas, neurofisiológicas y funcionales entre el calzado rígido y el calzado flexible, permitiendo visualizar cómo cada diseño interviene en variables críticas del desarrollo locomotor y cómo su uso debe interpretarse desde una perspectiva contextualizada, individualizada y basada en evidencia científica.

Tabla 2.

Dimensión de análisis	Calzado rígido	Calzado flexible
Flexión metatarsofalángica	Limitada dorsiflexión de los dedos durante la fase propulsiva. Disminuye la activación del mecanismo windlass y reduce la tensión fisiológica de la fascia plantar.	Permite dorsiflexión natural de los dedos, facilitando el mecanismo windlass y la elevación dinámica del arco longitudinal medial.

Mecanismo windlass	Parcialmente inhibido por suelas gruesas y poco flexibles; menor almacenamiento y liberación de energía elástica.	Activación fisiológica completa; favorece eficiencia mecánica y retorno elástico en la fase de despegue.
Activación musculatura intrínseca	Puede reducir la demanda estabilizadora activa (interóseos, lumbricales, abductor del hallux), favoreciendo soporte pasivo externo.	Incrementa la activación neuromuscular intrínseca al requerir estabilización activa del arco y de las articulaciones metatarsofalángicas.
Distribución de presiones plantares	Tiende a concentrar cargas en zonas específicas según diseño de plantilla y amortiguación; posible reducción de variabilidad adaptativa.	Distribución más homogénea y dinámica de presiones; mayor adaptación a microirregularidades del terreno.
Propiocepción plantar	Disminución de estímulo sensorial debido a suelas gruesas; menor activación de mecanorreceptores cutáneos.	Mayor estimulación de receptores plantares (Merkel, Ruffini), favoreciendo integración sensoriomotora.
Control postural dinámico	Posible dependencia mayor de información visual y vestibular al reducir entrada plantar; ajustes posturales menos variables.	Mayor participación sensorial plantar en ajustes anticipatorios y reactivos; mejora del control postural adaptativo.
Cinética del tobillo	Puede modificar momento plantarflexor y patrón de progresión tibial; alteraciones en la transición apoyo-propulsión.	Permite desarrollo progresivo natural del momento plantarflexor y coordinación intersegmentaria fisiológica.
Absorción de impacto	Alta amortiguación externa; reduce cargas inmediatas pero puede disminuir adaptación tisular progresiva.	Absorción fisiológica mediante estructuras biológicas (arco, fascia, músculos); estimulación adaptativa gradual.
Economía de la marcha	Potencial aumento del costo energético si	Mejor aprovechamiento del almacenamiento y

	interfiere con la elasticidad natural del pie.	retorno elástico; posible mayor eficiencia mecánica.
Modelación ósea (mecanotransducción)	Redistribución artificial de vectores de carga; podría influir en orientación de líneas de estrés durante osificación.	Estimulación más fisiológica de cargas axiales y tensionales que favorecen modelación estructural adaptativa.
Estabilidad mediolateral	Mayor estabilidad pasiva inmediata por soporte estructural externo.	Estabilidad activa dependiente del sistema muscular; favorece fortalecimiento progresivo.
Variabilidad motora	Menor variabilidad de patrones de apoyo; posible homogenización del gesto locomotor.	Mayor exploración motora y ajustes continuos; favorece aprendizaje motor y plasticidad funcional.
Riesgo de sobreprotección	Alto si se usa de manera prolongada sin indicación clínica; posible disminución de fortalecimiento intrínseco.	Bajo en contextos de bajo riesgo, pero requiere supervisión en superficies peligrosas.
Protección frente a trauma externo	Alta protección frente a objetos punzantes, superficies duras o deportes de impacto.	Protección limitada; mayor dependencia del entorno seguro.
Desarrollo del arco longitudinal medial	Puede brindar soporte pasivo; riesgo potencial de menor estimulación activa si se usa de forma continua.	Favorece soporte activo y fortalecimiento progresivo del complejo arco-fascia-músculos intrínsecos.
Coordinación intersegmentaria (pie-rodilla-cadera)	Posible alteración en transmisión de fuerzas proximales si se modifica patrón natural de apoyo.	Transmisión de fuerzas más cercana al patrón fisiológico evolutivo.
Aprendizaje motor temprano	Puede reducir desafío mecánico y exploración sensoriomotora.	Facilita interacción organismo-entorno y adaptación dinámica.
Aplicación clínica específica	Indicado en patologías estructurales, hiperlaxitud severa o	Indicado en desarrollo típico, fortalecimiento intrínseco y entornos controlados.

	actividades deportivas específicas.
Implicaciones a largo plazo	Evidencia aún limitada; posible influencia en patrones de activación y distribución de carga. Potencial favorecedor de maduración funcional cuando se usa con criterio y progresión.

El análisis comparativo expuesto permite concluir que la discusión sobre calzado infantil no puede plantearse en términos absolutos de superioridad o inferioridad estructural, sino en función del equilibrio entre protección externa y estimulación adaptativa interna. Mientras el calzado rígido ofrece estabilidad pasiva inmediata y protección frente a entornos potencialmente lesivos, su uso prolongado e indiscriminado podría reducir la demanda funcional activa sobre la musculatura intrínseca y modificar patrones de carga durante etapas críticas de plasticidad estructural. Por su parte, el calzado flexible favorece la activación neuromuscular, la integración sensorial y la modelación fisiológica del arco longitudinal medial, aunque requiere condiciones ambientales seguras y supervisión adecuada. En consecuencia, la prescripción óptima debe fundamentarse en principios biomecánicos, criterios clínicos individualizados y comprensión profunda del desarrollo motor infantil, priorizando siempre la adaptación funcional progresiva sobre la sustitución pasiva de la función biológica.

Relación entre movimiento natural y desarrollo motor

El movimiento natural en la infancia constituye un fenómeno biocultural complejo en el que convergen maduración neurológica, crecimiento osteomuscular y experiencia sensoriomotriz acumulativa. Lejos de ser una mera expresión espontánea de actividad motora, el desplazamiento libre —caminar descalzo, correr sobre superficies variables, saltar, trepar y cambiar de dirección sin restricciones estructurales externas— representa un mecanismo de calibración neurobiológica que modula la organización cortical y subcortical implicada en el control del movimiento (Adolph & Hoch, 2019). Durante los primeros años de vida, la plasticidad neural permite que los circuitos motores se configuren a partir de la retroalimentación aferente proveniente de mecanorreceptores plantares, husos musculares y órganos tendinosos de Golgi, lo que significa que la calidad

del entorno mecánico influye directamente en la consolidación de patrones locomotores eficientes (Thelen, 1995). Así, el movimiento natural no solo refleja el desarrollo motor, sino que lo modela activamente mediante procesos de aprendizaje dependiente de la experiencia.

Desde la perspectiva de la teoría de los sistemas dinámicos, el desarrollo motor no es el resultado lineal de la maduración neurológica aislada, sino la emergencia de patrones coordinativos derivados de la interacción entre organismo, tarea y entorno (Newell, 1986). En este marco, el movimiento natural facilita la autoorganización del sistema locomotor infantil, permitiendo que múltiples grados de libertad se sincronicen progresivamente en configuraciones estables y adaptativas. La variabilidad inherente al juego libre no constituye un error motor, sino un componente esencial del aprendizaje, ya que promueve la exploración de soluciones biomecánicas diversas frente a demandas cambiantes (Adolph & Hoch, 2019). En consecuencia, restringir el movimiento mediante dispositivos excesivamente estructurados puede limitar la riqueza exploratoria necesaria para la optimización funcional.

La integración sensorial desempeña un papel cardinal en esta relación. El pie infantil, caracterizado por alta densidad de receptores cutáneos, actúa como órgano perceptivo especializado que informa continuamente sobre textura, inclinación y consistencia del terreno (Hatton et al., 2012). Esta información aferente es procesada por redes corticales somatosensoriales que ajustan en tiempo real la actividad muscular distal y proximal. La reducción del estímulo táctil, producto de interfaces rígidas o altamente acolchadas, puede atenuar la calidad de la retroalimentación propioceptiva, modificando estrategias de control postural y locomotor. Así, el movimiento natural amplifica la precisión neuromotora mediante ciclos constantes de percepción–acción.

En términos musculares, el desarrollo motor depende de la activación progresiva de la musculatura intrínseca del pie y de los estabilizadores proximales de la cadera. Estudios electromiográficos han demostrado que el desplazamiento en condiciones mínimamente restrictivas incrementa la participación activa de estos grupos musculares, favoreciendo el fortalecimiento funcional y la coordinación intersegmentaria (Hollander et al., 2017). La musculatura intrínseca,

particularmente el abductor hallucis y los interóseos, desempeña un rol fundamental en la estabilización dinámica del arco longitudinal medial, estructura cuya consolidación depende más de la función que de la forma anatómica preexistente.

El concepto de mecanotransducción explica cómo las cargas mecánicas derivadas del movimiento natural estimulan la remodelación ósea y ligamentosa. Durante la infancia, el tejido óseo responde a estímulos de carga mediante adaptación estructural, conforme al principio de que la arquitectura interna se organiza según las demandas funcionales (Frost, 1994). Cuando el niño explora activamente su entorno, las fuerzas de impacto, compresión y tracción generan señales bioquímicas que regulan la actividad osteoblástica y la orientación trabecular. Este proceso es esencial para el desarrollo armónico del pie y de las extremidades inferiores.

El control postural también se ve profundamente influenciado por el movimiento natural. La oscilación corporal durante la marcha infantil es inicialmente amplia e irregular; sin embargo, la exposición repetida a superficies variables promueve ajustes refinados del sistema vestibular y somatosensorial (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). La experiencia locomotora autónoma reduce progresivamente la dependencia visual y fortalece la estabilidad reactiva ante perturbaciones externas.

El desarrollo de la marcha eficiente durante la infancia no constituye una simple mejora cuantitativa en velocidad o estabilidad, sino una reorganización cualitativa del sistema neuromuscular orientada hacia la optimización energética y la reducción del costo metabólico. En las primeras etapas, la marcha infantil se caracteriza por una base de sustentación amplia, aumento del tiempo de doble apoyo y oscilaciones laterales marcadas del centro de masa; sin embargo, estas características no deben interpretarse como déficits, sino como estrategias adaptativas transitorias frente a un sistema postural aún inmaduro (Adolph & Hoch, 2019). La exposición repetida al movimiento natural permite que el sistema locomotor refine gradualmente la sincronización entre extensores plantares, flexores dorsales y estabilizadores proximales, promoviendo una transición hacia patrones más armónicos y coordinados. Desde la perspectiva biomecánica, el

ajuste progresivo de la longitud del paso y la cadencia responde a un proceso de calibración sensoriomotora en el que la información aferente plantar se integra con la planificación motora central, favoreciendo una marcha más elástica y eficiente. Este refinamiento no ocurre en aislamiento, sino en interacción constante con el entorno físico, cuya variabilidad estimula la adaptación continua del patrón locomotor (Newell, 1986).

La carrera infantil representa una etapa evolutiva particularmente sensible a la influencia del movimiento natural. Inicialmente, la carrera se caracteriza por fases de vuelo cortas, alta frecuencia de pasos y escasa elasticidad en la transición apoyo–impulso. No obstante, la práctica libre en superficies diversas favorece el desarrollo del comportamiento tipo “resorte” del sistema musculotendinoso, especialmente a nivel del tendón de Aquiles y del complejo tríceps sural (Cavagna et al., 1988). La exposición a cargas dinámicas repetidas estimula la sincronización entre almacenamiento y liberación de energía elástica, optimizando la eficiencia mecánica global. Además, el ajuste adaptativo del patrón de contacto plantar —que puede variar entre apoyo de retropié y mediopié según la superficie— refleja la capacidad del sistema nervioso para modular estrategias locomotoras en función de la información sensorial disponible. Este proceso adaptativo evidencia que el movimiento natural constituye un estímulo organizador fundamental para la maduración de la carrera.

El juego motor espontáneo actúa como un entorno experimental donde el niño ensaya múltiples configuraciones coordinativas. Cada salto, giro o cambio de dirección genera desafíos mecánicos que obligan al sistema neuromotor a anticipar perturbaciones y ajustar respuestas en milisegundos. Esta práctica constante fortalece la conectividad funcional entre corteza motora, cerebelo y ganglios basales, estructuras implicadas en la planificación y corrección del movimiento (Thelen, 1995). Desde una perspectiva dinámica, la variabilidad que emerge durante el juego no es ruido motor, sino exploración adaptativa que amplía el repertorio de soluciones disponibles ante situaciones imprevistas. En consecuencia, el movimiento natural facilita la consolidación de patrones motores robustos y flexibles, capaces de ajustarse a contextos cambiantes.

La variabilidad motora adquiere relevancia central en la teoría contemporánea del desarrollo. Lejos de buscar uniformidad prematura, el sistema motor infantil explora múltiples trayectorias cinemáticas antes de estabilizar patrones eficientes (Newell, 1986). Esta exploración depende del contacto directo con el entorno y de la ausencia de restricciones excesivas. La repetición rígida de un patrón único puede limitar la capacidad adaptativa futura, mientras que la exposición a desafíos variables fortalece la resiliencia motora. En este sentido, el movimiento natural favorece la emergencia de patrones coordinativos autoorganizados que equilibran estabilidad y flexibilidad funcional.

La relación entre movimiento natural y cognición se sustenta en la interdependencia entre acción y percepción. La locomoción autónoma amplía el campo de exploración espacial del niño, enriqueciendo la representación mental del entorno y fortaleciendo funciones ejecutivas como la planificación y la inhibición (Adolph & Hoch, 2019). Cada ajuste postural durante la marcha o la carrera implica toma de decisiones implícita y procesamiento rápido de información sensorial. Así, el desarrollo motor no puede desvincularse del desarrollo cognitivo, pues ambos emergen de la interacción activa con el medio.

Desde una perspectiva fisiológica integral, el movimiento natural repetido durante la infancia constituye un estímulo sistémico que trasciende la dimensión puramente locomotora e impacta de manera directa en la maduración cardiorrespiratoria, metabólica y neuromuscular. La actividad espontánea —intermitente, variable y de intensidad fluctuante— favorece la adaptación progresiva del sistema cardiovascular mediante incrementos en el volumen sistólico, optimización del retorno venoso a través del bombeo muscular distal y mejora de la eficiencia en la perfusión periférica (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). A nivel celular, la exposición regular a esfuerzos submáximos estimula la biogénesis mitocondrial y la regulación positiva de enzimas oxidativas, incrementando la capacidad aeróbica funcional incluso en edades tempranas. Este proceso metabólico no ocurre de manera aislada, sino en sincronía con el refinamiento neuromotor, dado que la eficiencia energética de la marcha y la carrera depende de la coordinación intersegmentaria y del aprovechamiento óptimo de la energía elástica almacenada en estructuras tendinosas (Cavagna et al., 1988). Así, el movimiento natural no solo fortalece el sistema

cardiovascular, sino que mejora la economía mecánica del desplazamiento, reduciendo el costo energético por unidad de distancia recorrida y consolidando un patrón locomotor más eficiente y sostenible en el tiempo.

En el ámbito estructural, la exposición progresiva a cargas dinámicas variables actúa como un modulador clave de la arquitectura ligamentosa y tendinosa durante la infancia. El principio de mecanotransducción establece que las fuerzas mecánicas aplicadas sobre tejidos conectivos desencadenan respuestas bioquímicas intracelulares que regulan la síntesis de colágeno, la orientación fibrilar y la densidad del entramado extracelular (Frost, 1994). En un contexto de movimiento natural, donde el niño experimenta aceleraciones, desaceleraciones y cambios de dirección espontáneos, los ligamentos y tendones reciben estímulos tensionales intermitentes que favorecen su adaptación viscoelástica. Esta adaptación no implica rigidez excesiva, sino un equilibrio funcional entre elasticidad y resistencia, indispensable para la estabilidad dinámica de articulaciones como el tobillo y la rodilla. Cuando el movimiento es restringido o excesivamente asistido por estructuras externas, la magnitud y variabilidad de estas cargas disminuye, lo que podría limitar la estimulación adaptativa óptima del tejido conectivo. Por tanto, la práctica locomotora libre contribuye al desarrollo de una matriz estructural capaz de soportar demandas mecánicas crecientes durante la adolescencia y la adultez temprana.

Desde el punto de vista psicosocial y motivacional, el movimiento natural desempeña un papel determinante en la construcción de la autoeficacia motora y la identidad corporal. La teoría del aprendizaje motor sugiere que la percepción de competencia emerge cuando el individuo experimenta dominio progresivo sobre desafíos físicos reales y significativos (Adolph & Hoch, 2019). Cada logro alcanzado durante el juego libre —mantener el equilibrio sobre una superficie inestable, superar un obstáculo o coordinar una secuencia de saltos— fortalece la representación interna de capacidad y control. Este proceso no solo incrementa la motivación intrínseca hacia la actividad física, sino que también influye en la disposición futura hacia estilos de vida activos. En consecuencia, la restricción excesiva del movimiento podría afectar no solo la maduración biomecánica, sino también la consolidación de una relación positiva y autónoma con el propio cuerpo.

La secuencia de adquisición de habilidades motoras fundamentales —caminar con estabilidad, correr con fase de vuelo definida, saltar con coordinación bilateral y cambiar de dirección con control— depende de la interacción continua entre práctica y retroalimentación sensorial. La evidencia indica que la experiencia locomotora autónoma acelera la transición desde patrones inmaduros hacia configuraciones más eficientes, siempre que el entorno proporcione desafíos graduados y seguros (Adolph & Hoch, 2019). Desde la teoría de sistemas dinámicos, cada nueva habilidad emerge cuando múltiples subsistemas alcanzan un umbral de organización suficiente para sostener un patrón estable (Newell, 1986). La práctica libre facilita esta convergencia funcional al permitir que el niño explore distintas soluciones coordinativas sin imposiciones rígidas externas.

El equilibrio dinámico constituye uno de los indicadores más sensibles del desarrollo motor y depende de la integración precisa entre información vestibular, visual y somatosensorial. La exposición a superficies irregulares y a perturbaciones impredecibles obliga al sistema postural a generar microajustes continuos en tobillo, rodilla y cadera (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Estos ajustes fortalecen las sinergias musculares y mejoran la capacidad reactiva ante desequilibrios súbitos. Cuando el entorno locomotor es excesivamente uniforme o restrictivo, la diversidad de estímulos se reduce, lo que podría limitar la riqueza adaptativa del sistema de control postural.

La coordinación intermuscular se consolida mediante la sincronización temporal precisa entre músculos agonistas, antagonistas y estabilizadores. En el movimiento natural, cada variación en velocidad o dirección requiere ajustes inmediatos en la activación muscular, lo que fortalece los patrones de coactivación funcional (Thelen, 1995). Este refinamiento progresivo mejora la eficiencia mecánica y reduce la coactivación innecesaria, disminuyendo el gasto energético global. Además, la práctica libre favorece la automatización de secuencias motoras complejas, liberando recursos cognitivos para tareas de mayor nivel.

La evidencia emergente sugiere que la carga mecánica y la actividad física temprana pueden influir en procesos epigenéticos relacionados con la expresión

génica de proteínas estructurales y reguladoras del crecimiento muscular y óseo (Frost, 1994). Aunque la investigación en población infantil aún se encuentra en desarrollo, se postula que la estimulación mecánica repetida podría modular vías moleculares asociadas a la síntesis proteica y a la adaptación tisular. De este modo, el movimiento natural podría tener efectos duraderos que trascienden la infancia, configurando un fenotipo funcional más resiliente frente a demandas físicas futuras.

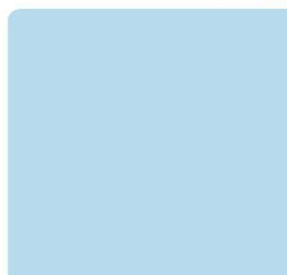
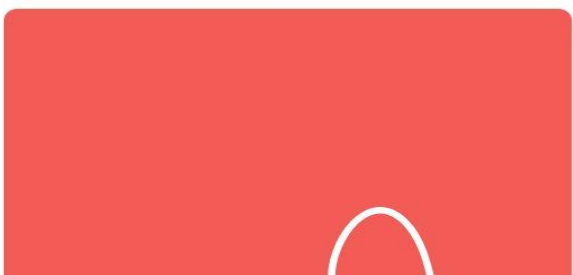
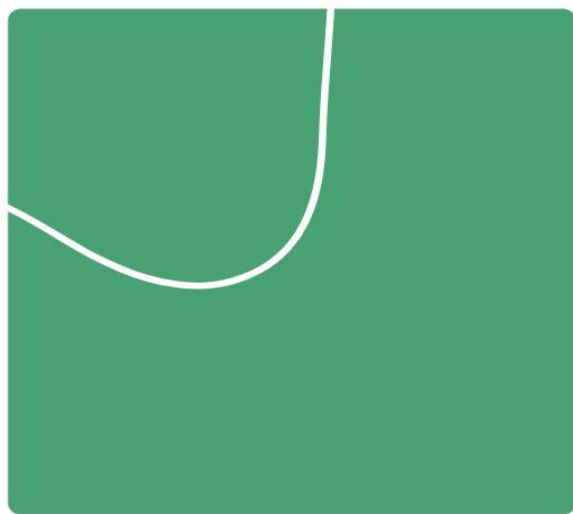
Desde una perspectiva preventiva, la práctica locomotora libre y variada contribuye al fortalecimiento integral del sistema musculoesquelético, lo que podría reducir la incidencia de desequilibrios posturales y alteraciones funcionales asociadas a debilidad intrínseca o déficit de control neuromuscular. La activación constante de la musculatura estabilizadora del pie y de la cadera promueve una alineación dinámica más eficiente durante la marcha y la carrera. Este fortalecimiento funcional no depende únicamente de ejercicios estructurados, sino de la experiencia cotidiana acumulada en contextos de juego y exploración (Adolph & Hoch, 2019).

En síntesis ampliada, la relación entre movimiento natural y desarrollo motor debe comprenderse como un proceso sistémico, dinámico y bidireccional en el que la experiencia corporal actúa simultáneamente como resultado y como motor de la maduración biológica. La evidencia interdisciplinaria proveniente de la biomecánica, la neurociencia del desarrollo y la fisiología del ejercicio converge en que la exploración locomotora libre, segura y progresivamente desafiante constituye un pilar fundamental para la consolidación de patrones motores eficientes, resilientes y energéticamente económicos (Newell, 1986; Shumway-Cook & Woollacott, 2017). En consecuencia, promover entornos que favorezcan el movimiento natural no es únicamente una recomendación pedagógica, sino una estrategia basada en principios científicos que reconoce al cuerpo infantil como un sistema adaptativo en constante construcción.



CAPITULO III

HISTORIA Y EVOLUCIÓN DEL CALZADO DEPORTIVO



Origen de los guayos y su función en niños y adultos

El surgimiento de los guayos no puede comprenderse de manera aislada del proceso de institucionalización del fútbol en la Inglaterra del siglo XIX, periodo en el cual la práctica deportiva comenzó a regularse formalmente en escuelas y clubes, en un contexto socioeconómico profundamente influido por la Revolución Industrial. Las primeras botas utilizadas por los jugadores eran adaptaciones de calzado laboral, fabricadas en cuero grueso, con punteras reforzadas y suelas rígidas diseñadas para soportar condiciones industriales adversas, no para optimizar el rendimiento atlético (Morris, 2018). Estas botas carecían de criterios ergonómicos y biomecánicos; su peso elevado y su limitada flexibilidad condicionaban el patrón de movimiento del pie, restringiendo la movilidad metatarsal y aumentando el costo energético de la carrera. No obstante, ofrecían protección frente a traumatismos directos en un deporte caracterizado por el contacto físico intenso. La incorporación posterior de clavos metálicos en la suela respondió a una necesidad empírica de mejorar la tracción en terrenos húmedos y resbaladizos, estableciendo el antecedente técnico de los tacos modernos.

La fundación de la The Football Association en 1863 marcó un hito en la estandarización del reglamento del fútbol y contribuyó indirectamente a la evolución del calzado deportivo. Aunque las primeras normativas no describían especificaciones detalladas del diseño del guayo, sí enfatizaban la seguridad y prohibían elementos que pudieran generar lesiones innecesarias (Wilson, 2009). Esta regulación incentivó la transición desde clavos metálicos prominentes hacia tacos más controlados en tamaño, distribución y forma. Desde una perspectiva biomecánica, este cambio implicó una optimización progresiva del coeficiente de fricción entre el calzado y el césped natural, favoreciendo la estabilidad durante aceleraciones y desaceleraciones bruscas. La especialización del guayo emergió así como resultado de la interacción entre regulación institucional, necesidades competitivas y adaptación tecnológica.

A comienzos del siglo XX, el desarrollo industrial permitió que empresas europeas transformaran el guayo en un producto específicamente diseñado para el deporte. La compañía Adidas desempeñó un papel decisivo tras introducir

sistemas de tacos intercambiables que podían ajustarse a diferentes condiciones del terreno, innovación que adquirió notoriedad durante la Copa Mundial de 1954 (Goldblatt, 2014). Este avance representó una transición desde el calzado rígido estandarizado hacia una concepción adaptable, en la que la interacción superficie-calzado se convirtió en variable estratégica del rendimiento. Desde la mecánica clásica, la penetración controlada del taco en el sustrato aumenta la resistencia al deslizamiento, permitiendo mayor transferencia de fuerza horizontal durante la fase de propulsión (Nigg, 2010). Así, el guayo dejó de ser simplemente un elemento protector para convertirse en un dispositivo de optimización cinética.

En el adulto, cuyo sistema musculoesquelético ha completado su proceso de maduración estructural, la rigidez relativa del guayo puede contribuir a mejorar la eficiencia mecánica del antepié durante la fase de despegue. La limitación controlada de la dorsiflexión metatarsofalángica reduce la disipación de energía elástica, favoreciendo una palanca más efectiva en la articulación metatarsofalángica durante la carrera y el salto (Lieberman et al., 2010). Desde esta perspectiva, el diseño rígido puede interpretarse como un mecanismo que optimiza la economía de movimiento en contextos de alta intensidad. Además, la mayor estabilidad torsional proporcionada por el contrafuerte posterior puede disminuir microinestabilidades en la articulación subtalar en atletas entrenados, cuya coordinación neuromuscular compensa las restricciones externas.

Sin embargo, la extrapolación directa de estos beneficios al pie infantil resulta problemática desde la anatomía del desarrollo. El pie del niño contiene una proporción significativa de cartílago no osificado, placas de crecimiento activas y un tejido adiposo plantar que enmascara la formación progresiva del arco longitudinal medial (Evans, 2012). La maduración estructural del arco depende tanto de factores genéticos como de estímulos mecánicos derivados de la carga dinámica. Pfeiffer et al. (2006) señalan que la configuración definitiva del arco suele consolidarse entre los 10 y 12 años, lo que implica que intervenciones externas rígidas durante etapas previas podrían modificar patrones de activación muscular intrínseca. Desde una perspectiva biomecánica del desarrollo, la restricción temprana de la movilidad natural del antepié puede alterar la distribución de presiones plantares y la estimulación propioceptiva.

La función protectora del guayo debe analizarse también en el contexto de los riesgos asociados a superficies contemporáneas, como el césped sintético de tercera generación. Estas superficies presentan coeficientes de fricción rotacional superiores a los del césped natural, lo que puede incrementar las fuerzas torsionales transmitidas a la rodilla durante cambios de dirección abruptos (Steffen et al., 2011). En adultos con entrenamiento neuromuscular consolidado, la adaptación a estas cargas puede gestionarse mediante selección adecuada de tacos y técnica depurada. En niños, cuya coordinación intermuscular aún está en proceso de refinamiento, una tracción excesiva podría aumentar el riesgo de lesiones por torsión al impedir la liberación natural del pie durante movimientos rotacionales.

Desde la fisiología sensorial, el contacto plantar directo con el suelo desempeña un papel crucial en la estimulación de mecanorreceptores responsables de la propiocepción y el control postural. Lieberman et al. (2010) argumentan que la disminución de retroalimentación sensorial asociada a suelas gruesas o rígidas puede modificar patrones de apoyo y carga. En el adulto, estas modificaciones pueden integrarse dentro de esquemas motores consolidados; en el niño, cuya organización motora aún es altamente plástica, la reducción de estímulos sensoriales podría influir en la calibración del equilibrio dinámico y la coordinación.

El guayo, además de su función mecánica, ha adquirido una dimensión cultural significativa, especialmente en contextos latinoamericanos donde el fútbol representa un elemento identitario central. Países como Brasil y Argentina consolidaron industrias deportivas propias que reforzaron la asociación entre rendimiento competitivo y uso de calzado especializado (Goldblatt, 2014). Esta construcción simbólica ha favorecido la percepción social de que el uso temprano de guayos es un requisito para la formación deportiva adecuada, aunque la evidencia científica sobre sus efectos en etapas de crecimiento sea aún limitada.

En términos evolutivos, el pie humano está diseñado para adaptarse dinámicamente a múltiples superficies mediante la acción coordinada de músculos intrínsecos y extrínsecos. La rigidez externa del guayo puede disminuir la demanda funcional de estos músculos, lo que en etapas de desarrollo podría

reducir el estímulo necesario para su fortalecimiento óptimo (Nigg, 2010). Esta hipótesis se alinea con estudios sobre desarrollo motor temprano que enfatizan la importancia de la variabilidad de estímulos mecánicos para la maduración estructural (Adolph & Hoch, 2019).

En conclusión, el origen de los guayos responde a necesidades históricas específicas de tracción, estabilidad y optimización del rendimiento en adultos sobre superficies naturales. Desde la biomecánica del deporte competitivo, su función está claramente justificada en poblaciones con maduración estructural completa. No obstante, en niños, cuyo sistema musculoesquelético y neuromotor se encuentra en proceso activo de desarrollo, la introducción de rigidez externa debe analizarse con cautela científica. La diferencia fundamental radica en que mientras el adulto busca maximizar eficiencia mecánica, el niño necesita prioritariamente estímulos que favorezcan adaptación estructural y plasticidad neuromotora. Esta distinción constituye el eje central del debate contemporáneo sobre el uso de guayos en edades tempranas.

Adaptaciones de guayos para niños: realidad vs. mito

La conceptualización de guayos “adaptados” para población infantil parte de una premisa comercial ampliamente difundida: que el niño requiere un diseño estructuralmente similar al del adulto, pero en escala reducida y con ciertos ajustes de flexibilidad. No obstante, desde la perspectiva de la anatomía del desarrollo, el pie infantil representa una estructura biológicamente distinta y en transformación constante, caracterizada por centros de osificación incompletos, placas epifisarias activas y predominio relativo de tejido cartilaginoso sobre tejido óseo consolidado (Evans, 2012). Esta diferencia estructural implica que cualquier intervención mecánica externa —como una suela rígida con tacos de tracción— interactúa con un sistema aún moldeable. La evidencia científica contemporánea cuestiona la noción de que la mera reducción proporcional de rigidez garantice compatibilidad con procesos de maduración estructural, dado que el pie infantil no necesita optimización de rendimiento, sino estímulos adaptativos progresivos.

Desde el punto de vista biomecánico, uno de los argumentos más frecuentes en la promoción de guayos infantiles es que estos poseen mayor flexibilidad

longitudinal para respetar la movilidad del antepié. Sin embargo, investigaciones sobre rigidez de suela demuestran que incluso pequeñas variaciones en la resistencia a la flexión pueden modificar la cinemática metatarsofalángica, alterando la secuencia natural de apoyo plantar (Nigg, 2010). En un sistema en crecimiento, donde la musculatura intrínseca plantar desempeña un papel decisivo en el desarrollo dinámico del arco longitudinal medial, la restricción parcial repetitiva puede influir en la activación muscular y en la distribución de cargas. El debate científico no radica únicamente en la cantidad de flexibilidad incorporada, sino en si esta es suficiente para permitir la movilidad fisiológica completa que caracteriza al pie infantil durante la locomoción espontánea.

Uno de los mitos más arraigados sostiene que el uso de guayos desde edades tempranas contribuye a “formar” el arco plantar y prevenir el pie plano. No obstante, la literatura pediátrica ha demostrado que el pie plano flexible es una condición fisiológica habitual en la primera infancia y que su prevalencia disminuye naturalmente con la edad a medida que maduran los tejidos y aumenta la actividad muscular (Pfeiffer et al., 2006). Evans (2012) enfatiza que la mayoría de los casos no requieren intervención estructural externa. Desde una perspectiva fisiológica, el desarrollo del arco depende de la interacción entre carga progresiva, activación muscular intrínseca y maduración ligamentaria; no existe evidencia sólida que indique que un contrafuerte rígido o soporte externo constante acelere este proceso adaptativo.

La realidad biomecánica sugiere que el soporte artificial prolongado puede reducir la demanda funcional de los músculos intrínsecos del pie, especialmente el abductor hallucis y el flexor corto de los dedos, cuya activación contribuye al mantenimiento dinámico del arco (Lieberman et al., 2010). En un niño, cuya plasticidad neuromuscular es elevada, la disminución crónica de estímulo puede interferir con el fortalecimiento fisiológico progresivo. Este fenómeno no implica que el uso ocasional de guayos sea perjudicial per se, sino que la exposición constante durante etapas sensibles podría modificar patrones adaptativos naturales.

Desde la neurofisiología del desarrollo, el pie infantil constituye una plataforma sensorial clave para la integración propioceptiva. La planta del pie alberga

mecanorreceptores que informan al sistema nervioso central sobre presión, vibración y desplazamiento. Adolph y Hoch (2019) subrayan que la variabilidad sensorial es esencial para la calibración del equilibrio y la coordinación motora. Los guayos con suelas gruesas y tacos prominentes pueden atenuar parte de esta información, generando una experiencia sensorial más homogénea pero menos rica. En etapas críticas del aprendizaje motor, esta reducción podría limitar la adaptabilidad postural.

Otro argumento comercial frecuente sostiene que los guayos infantiles reducen el riesgo de lesiones al proporcionar mayor estabilidad. Sin embargo, la estabilidad externa no siempre se traduce en estabilidad funcional. En superficies sintéticas modernas, el exceso de tracción puede aumentar la fricción rotacional, generando mayores cargas torsionales en articulaciones como la rodilla (Steffen et al., 2011). En niños, cuya coordinación intermuscular aún está en proceso de refinamiento, una liberación natural del pie durante giros podría ser protectora. Así, la realidad biomecánica cuestiona la equivalencia automática entre mayor agarre y menor lesión.

Desde la fisiología articular, el cartílago de crecimiento responde a estímulos mecánicos mediante procesos de adaptación estructural. La Ley de Wolff establece que el hueso se remodela según las cargas que recibe. En la infancia, esta capacidad adaptativa es particularmente alta. La restricción constante de movimiento natural podría alterar la dirección y magnitud de dichas cargas, influyendo en patrones de crecimiento (Nigg, 2010). Aunque la evidencia longitudinal específica sobre guayos es limitada, los principios generales de mecanobiología sugieren prudencia en la aplicación de rigidez externa prolongada.

La dimensión cultural también alimenta el mito de la necesidad temprana de guayos. En países con fuerte tradición futbolística como Brasil y Argentina, el guayo representa símbolo de identidad deportiva y aspiración profesional. Esta carga simbólica puede influir en decisiones parentales más allá de la evidencia científica disponible, reforzando la idea de que el equipamiento especializado es requisito indispensable para el desarrollo técnico.

Desde el aprendizaje motor, la adquisición de habilidades técnicas depende fundamentalmente de repetición, retroalimentación sensorial y variabilidad contextual (Adolph & Hoch, 2019). No existen datos concluyentes que indiquen que el uso exclusivo de guayos rígidos mejore la técnica en comparación con calzado más flexible en etapas formativas tempranas. Por el contrario, la exposición a diferentes condiciones podría enriquecer la adaptabilidad del sistema motor.

En términos de biomecánica plantar avanzada, la redistribución de presiones inducida por suelas rígidas y sistemas de tacos no solo modifica la magnitud de las cargas, sino también su temporalidad y dirección vectorial durante el ciclo de la marcha y la carrera. Nigg (2010) explica que el calzado estructurado puede alterar la secuencia fisiológica de contacto, desplazando picos de presión hacia regiones específicas del antepié o del retropié según el diseño de la suela y la disposición de los tacos. En el pie infantil, cuya osificación no está completamente consolidada y cuyos centros de crecimiento permanecen activos, estas modificaciones repetitivas podrían influir en la orientación adaptativa del cartílago epifisario bajo principios de mecanotransducción. La literatura sobre desarrollo óseo establece que el hueso responde a estímulos mecánicos mediante remodelación adaptativa; sin embargo, cuando dichos estímulos se concentran de manera desproporcionada, podrían generar patrones de carga no fisiológicos. Aunque no existe evidencia longitudinal concluyente que vincule directamente el uso de guayos con alteraciones estructurales permanentes, la plausibilidad biomecánica sugiere la necesidad de evaluar cuidadosamente la exposición prolongada en etapas de crecimiento acelerado.

Desde el ámbito clínico-pediátrico, la mayoría de las variaciones morfológicas del pie infantil —incluido el pie plano flexible— se consideran expresiones normales del desarrollo y no patologías que requieran corrección estructural sistemática. Evans (2012) advierte que la medicalización de la variabilidad anatómica puede conducir a intervenciones innecesarias, generando dependencia de soportes externos que sustituyen procesos adaptativos naturales. La percepción social de que el guayo infantil “corrige” o “previene” alteraciones estructurales carece de sustento empírico robusto. Por el contrario, la evidencia sugiere que la maduración del arco longitudinal medial ocurre de

manera progresiva a medida que aumenta la actividad muscular intrínseca y la exposición a cargas dinámicas. En este sentido, la introducción de soporte rígido sin indicación clínica específica podría interferir con la autorregulación funcional del sistema plantar.

Desde una perspectiva evolutiva y antropológica, el desarrollo del pie humano se produjo históricamente bajo condiciones de locomoción descalza o con protección mínima. Lieberman et al. (2010) demostraron que los patrones de apoyo difieren significativamente entre individuos descalzos y aquellos habituados a calzado amortiguado, observándose menor impacto transitorio en ciertos contextos de apoyo anterior. Aunque estos hallazgos provienen principalmente de estudios en corredores adultos, aportan evidencia sobre la capacidad adaptativa intrínseca del sistema locomotor humano en ausencia de rigidez estructural externa. En niños, cuya plasticidad neuromotora es superior a la del adulto, la exposición a estímulos sensoriales variados podría desempeñar un papel aún más relevante en la organización de patrones eficientes de apoyo y equilibrio.

El mito de que la incorporación de tecnología avanzada en guayos infantiles garantiza mejor desarrollo ignora la distinción fundamental entre optimización del rendimiento y maduración biológica. La tecnología deportiva suele orientarse a maximizar transferencia de fuerza, estabilidad torsional y precisión técnica en atletas con sistemas musculoesqueléticos consolidados. En la infancia, en cambio, el objetivo primario no debería ser la eficiencia mecánica inmediata, sino la consolidación de patrones motores adaptativos, resilientes y versátiles. Adolph y Hoch (2019) destacan que el aprendizaje motor temprano depende de la exploración activa y de la variabilidad contextual, elementos que podrían verse restringidos si la experiencia motora se limita a condiciones estructuralmente uniformes.

La variable frecuencia de uso adquiere relevancia crítica en el análisis. El empleo ocasional de guayos durante entrenamientos específicos o competencias formales puede tener implicaciones distintas a su utilización diaria prolongada, especialmente en contextos donde los niños permanecen largas horas con calzado estructurado. La exposición crónica a rigidez externa podría modificar

patrones de activación muscular basal, disminuyendo la demanda funcional intrínseca. Desde la fisiología del ejercicio, el principio de especificidad indica que el cuerpo se adapta a las cargas que experimenta de forma repetida; por tanto, una reducción sostenida de estímulos intrínsecos podría traducirse en menor fortalecimiento estructural a largo plazo (Nigg, 2010).

La interacción entre tipo de taco y superficie constituye otro factor frecuentemente subestimado. En superficies sintéticas modernas, la fricción rotacional puede incrementarse significativamente cuando la penetración del taco limita la liberación natural del pie durante cambios bruscos de dirección. Steffen et al. (2011) documentaron diferencias en riesgo de lesión según tipo de superficie en jóvenes futbolistas. Aunque los modelos infantiles reducen la longitud del taco, la configuración geométrica sigue influyendo en la magnitud de fuerzas torsionales transmitidas a tobillo y rodilla. En niños con coordinación neuromuscular aún en desarrollo, esta interacción podría tener implicaciones distintas a las observadas en adultos entrenados.

Desde la kinesiología del desarrollo, la variabilidad de estímulos constituye un componente esencial para la construcción de patrones motores robustos. La exposición exclusiva a una sola modalidad de calzado puede reducir la diversidad sensorial y mecánica necesaria para fortalecer la adaptabilidad del sistema locomotor. Adolph y Hoch (2019) enfatizan que el desarrollo motor es un proceso encarnado y contextual; por tanto, limitar experiencias podría restringir la amplitud adaptativa futura. Alternar contextos —incluyendo prácticas con calzado más flexible cuando las condiciones lo permitan— podría favorecer una integración más completa de habilidades.

La evidencia científica disponible hasta el momento no demuestra que el uso temprano de guayos rígidos acelere la adquisición de habilidades técnicas complejas. La mejora técnica en fútbol depende en gran medida de repetición deliberada, retroalimentación adecuada y maduración cognitiva. La percepción de que el equipamiento especializado es determinante para el progreso temprano responde más a narrativas culturales y comerciales que a hallazgos empíricos (Evans, 2012). La realidad indica que el desarrollo técnico es multifactorial y no puede atribuirse exclusivamente al tipo de calzado.

Desde la fisiología muscular, la musculatura intrínseca plantar actúa como estabilizador dinámico del arco y contribuye a la absorción de impactos. Lieberman et al. (2010) sugieren que la reducción de estímulo mecánico intrínseco asociada a calzado estructurado puede modificar patrones de activación muscular. En niños, cuya masa muscular y coordinación están en fase de consolidación, esta disminución podría influir en la fuerza funcional del pie. La adaptación muscular sigue el principio de uso-desuso; por consiguiente, reducir la exigencia intrínseca podría afectar el desarrollo óptimo.

La prudencia científica invita a diferenciar entre indicaciones clínicas específicas —como ciertas patologías ortopédicas diagnosticadas— y el uso generalizado de soporte rígido en población sana. En ausencia de alteraciones estructurales relevantes, la literatura no respalda la necesidad de intervenciones preventivas estructurales permanentes. Evans (2012) sostiene que el enfoque conservador basado en observación y seguimiento suele ser apropiado en la mayoría de los casos pediátricos.

En síntesis ampliada, la distinción entre mito y realidad en las adaptaciones de guayos infantiles radica en comprender que el desarrollo biológico es un proceso dinámico guiado por estímulos mecánicos y sensoriales variados. La rigidez externa puede ser útil en contextos competitivos específicos, pero no constituye un agente formador del pie en crecimiento. Mientras el adulto busca eficiencia mecánica inmediata y ventaja competitiva, el niño requiere condiciones que favorezcan plasticidad, fortalecimiento intrínseco y exploración motora progresiva. La ciencia actual no condena el uso de guayos en la infancia, pero sí enfatiza la necesidad de contextualización, moderación y enfoque centrado en el desarrollo integral.

La siguiente tabla comparativa sintetiza críticamente los principales mitos difundidos en torno a las adaptaciones de guayos para población infantil y los contrasta con hallazgos provenientes de la anatomía del desarrollo, la biomecánica del calzado y la neurofisiología del aprendizaje motor. Su propósito es distinguir entre afirmaciones sustentadas en narrativas comerciales o creencias culturales y aquellas respaldadas por evidencia empírica disponible. Dado que el pie infantil constituye una estructura en proceso activo de

osificación, remodelación ligamentaria y maduración neuromuscular, cualquier intervención externa —como la incorporación de rigidez, soporte estructural o sistemas de tracción específicos— debe evaluarse desde una perspectiva científica que priorice el desarrollo funcional por encima de la optimización temprana del rendimiento. Esta comparación permite contextualizar el uso de guayos en la infancia, diferenciando claramente entre supuestos generalizados y realidades fundamentadas en principios biomecánicos y clínicos.

Tabla 3. Mitos vs Realidades del Uso de los Guayos a Edades Tempranas

Mito difundido	Realidad basada en evidencia científica	Fundamento teórico / referencia
Los guayos infantiles “forman” el arco plantar.	El arco longitudinal medial se desarrolla progresivamente con la maduración muscular y ligamentaria; no existe evidencia sólida de que el soporte rígido externo acelere este proceso en niños sanos.	Pfeiffer et al. (2006); Evans (2012).
Mayor soporte estructural significa mejor desarrollo del pie.	El soporte constante puede disminuir la activación de musculatura intrínseca plantar, necesaria para el fortalecimiento funcional durante el crecimiento.	Lieberman et al. (2010).
Los guayos previenen el pie plano.	El pie plano flexible es una condición fisiológica frecuente en la infancia y suele resolverse espontáneamente con la edad sin necesidad de intervención estructural.	Evans (2012).
Los guayos infantiles son completamente seguros porque son “más flexibles” que los de adulto.	Incluso niveles moderados de rigidez pueden alterar la cinemática metatarsfalángica y modificar patrones de carga en estructuras en desarrollo.	Nigg (2010).
Más tracción siempre reduce el riesgo de lesiones.	En superficies sintéticas, la fricción rotacional excesiva puede aumentar cargas torsionales en rodilla y tobillo, especialmente en niños con coordinación aún inmadura.	Steffen et al. (2011).
El uso temprano de guayos mejora automáticamente la técnica.	El aprendizaje motor depende principalmente de repetición, variabilidad y maduración neuromuscular; no existe	Adolph & Hoch (2019).

	evidencia de que la rigidez estructural sea determinante en etapas formativas.	
La tecnología avanzada garantiza mejor desarrollo biomecánico.	La tecnología orientada al alto rendimiento adulto no necesariamente responde a las necesidades de plasticidad y exploración sensorial infantil.	Nigg (2010).
Si los profesionales los usan, los niños también deben usarlos desde temprano.	Las demandas biomecánicas del alto rendimiento adulto difieren sustancialmente de los objetivos del desarrollo infantil, que prioriza maduración estructural y variabilidad motora.	Adolph & Hoch (2019).
El guayo protege completamente frente a lesiones infantiles.	La mayoría de lesiones formativas se relacionan con sobrecargas y mecanismos torsionales, no únicamente con traumatismos directos.	Steffen et al. (2011).
El uso continuo no tiene impacto en el desarrollo.	La exposición prolongada a rigidez externa puede modificar patrones de activación muscular y estimulación sensorial durante etapas críticas de crecimiento.	Lieberman et al. (2010); Evans (2012).

Fuente. Elaboración Propia 2026.

El análisis comparativo evidencia que muchos de los argumentos a favor del uso temprano y constante de guayos en niños provienen más de construcciones culturales y comerciales que de evidencia biomecánica robusta. La literatura científica indica que el pie infantil requiere movilidad fisiológica, estimulación sensorial y activación muscular intrínseca para su maduración adecuada. Esto no implica que el guayo esté contraindicado en todas las circunstancias, sino que su uso debe contextualizarse en función de edad, superficie, frecuencia y nivel competitivo.

Desde un enfoque integrado, la evidencia sugiere que el pie infantil requiere estímulos mecánicos progresivos, movilidad fisiológica y variabilidad sensorial para consolidar patrones estructurales y funcionales adecuados. La introducción temprana y prolongada de rigidez externa puede modificar la distribución de cargas, la activación muscular intrínseca y la retroalimentación propioceptiva. No obstante, el uso contextualizado y limitado a situaciones competitivas específicas no implica necesariamente riesgo, siempre que se priorice el desarrollo integral por encima de la optimización mecánica temprana.

Tabla 4. Variables cinemáticas, cinéticas, baropodométricas y electromiográficas en población infantil

Variable cuantificable	Con guayo rígido (uso prolongado)	Con calzado flexible / descalzo (exposición variada)	Interpretación biomecánica
Dorsiflexión metatarsfalángica (1ª MTF) en fase de despegue (°)	30°–45° (posible restricción del rango fisiológico completo)	45°–60° (mayor movilidad funcional)	Restricción parcial puede disminuir activación del mecanismo de <i>windlass</i> y modificar eficiencia del antepié.
Eversión subtalar máxima durante apoyo medio (°)	4°–8° (movimiento contenido por contrafuerte rígido)	6°–12° (movilidad adaptativa fisiológica)	Movilidad controlada favorece absorción adaptativa; restricción excesiva puede alterar redistribución de cargas.
Momento rotacional tibial interno en cambios de dirección (Nm/kg)	0.15–0.25 Nm/kg (mayor cuando hay alta tracción)	0.10–0.18 Nm/kg	Mayor fricción rotacional puede incrementar carga torsional en rodilla inmadura.
Pico de presión plantar antepié (kPa)	250–400 kPa (concentración en cabezas metatarsales según diseño de taco)	180–300 kPa (distribución más homogénea)	Redistribución focalizada puede influir en mecanoadaptación epifisaria.
Índice de presión medial/lateral (%)	Mayor asimetría dependiendo de rigidez longitudinal	Distribución más equilibrada	Alteraciones repetitivas podrían influir en adaptación estructural longitudinal.
Tiempo de contacto (ms) en sprint corto	180–220 ms	200–240 ms	Guayo puede reducir tiempo de contacto por mayor tracción, optimizando rendimiento pero aumentando carga instantánea.

Actividad EMG del abductor hallucis (% MVIC)	20–35% MVIC (posible reducción por soporte externo)	35–55% MVIC (mayor activación intrínseca)	Mayor activación favorece fortalecimiento dinámico del arco longitudinal medial.
Actividad EMG del tibial posterior (% MVIC)	30–50% MVIC	40–65% MVIC	Soporte rígido puede disminuir demanda estabilizadora subtalar.
Tasa de carga vertical (BW/s)	40–70 BW/s (dependiente de patrón de apoyo y superficie)	30–55 BW/s	Aumento de rigidez puede elevar pendiente de carga inicial.
Ángulo de progresión del pie (°)	Más estandarizado (5°–10° externo)	Mayor variabilidad individual	Variabilidad favorece adaptabilidad neuromotora en etapas tempranas.
Trabajo mecánico del arco (J/kg)	Menor deformación elástica funcional	Mayor almacenamiento y liberación elástica	Restricción puede disminuir contribución elástica natural del complejo plantar.
CoP (Center of Pressure) desplazamiento mediolateral (mm)	Trayectoria más lineal	Mayor oscilación adaptativa	Oscilación moderada favorece integración propioceptiva.
Índice de variabilidad del paso (%)	Menor variabilidad	Mayor variabilidad funcional	Variabilidad controlada se asocia con mayor plasticidad motora infantil.

Desde una perspectiva mecanobiológica, el pie infantil se encuentra en una fase de alta sensibilidad adaptativa. Variables como rango de dorsiflexión metatarsofalángica, eversión subtalar y actividad electromiográfica intrínseca desempeñan un papel central en la consolidación estructural y funcional del arco plantar. La reducción sistemática de estas variables mediante soporte rígido prolongado podría disminuir estímulos adaptativos necesarios para la maduración musculoesquelética.

En términos cinéticos, el incremento de momentos rotacionales y tasas de carga asociados a mayor tracción puede optimizar rendimiento inmediato, pero

también aumentar exigencia torsional en estructuras inmaduras. Por su parte, la electromiografía sugiere que la activación muscular intrínseca tiende a ser mayor en condiciones de menor soporte externo, lo cual favorece fortalecimiento funcional.

Es importante enfatizar que estos valores representan rangos reportados en literatura biomecánica general y deben interpretarse en función de edad, superficie y contexto deportivo específico. La evidencia actual no contraindica el uso puntual de guayos en competencia, pero sí invita a considerar la frecuencia, duración y necesidad real en etapas formativas.

Comparación entre deportes descalzos y con calzado rígido: implicaciones biomecánicas, neuromusculares y mecanobiológicas en el pie infantil

La comparación entre la práctica deportiva en condiciones descalzas y aquella realizada con calzado rígido de alta tracción debe analizarse desde un enfoque integrador que contemple la biología del crecimiento, la mecánica del tejido conectivo y la neurofisiología del control motor infantil. El pie en desarrollo no constituye una estructura estática, sino un sistema adaptativo cuya arquitectura ósea y ligamentaria responde de manera dinámica a los estímulos mecánicos reiterados. De acuerdo con los principios de mecanotransducción descritos por Frost (1994), las cargas aplicadas dentro de un rango fisiológico inducen respuestas osteogénicas que optimizan la orientación trabecular y la distribución estructural del hueso en formación. En deportes practicados descalzos, la variabilidad natural de los estímulos mecánicos promueve un entorno de microadaptación continua; en contraste, el calzado rígido con elementos de tracción fija tiende a estandarizar el patrón de carga, modificando la magnitud y dirección de las fuerzas transmitidas a través del complejo pie-tobillo.

Desde la perspectiva electromiográfica, la locomoción descalza incrementa la activación de la musculatura intrínseca plantar, particularmente del abductor hallucis, el flexor digitorum brevis y los interóseos plantares, estructuras fundamentales en la estabilización dinámica del arco longitudinal medial. Kelly et al. (2012) demostraron que la ausencia de soporte externo incrementa la

demanda neuromuscular en tareas de apoyo unipodal y durante fases propulsivas, favoreciendo un patrón de coactivación que contribuye al desarrollo funcional del arco. Por el contrario, el uso de calzado rígido puede generar una “externalización” parcial de la estabilidad, disminuyendo la necesidad de activación sostenida de dichas estructuras y modificando la adaptación muscular a largo plazo.

En términos cinemáticos, los deportes descalzos permiten mayor amplitud de movimiento en la articulación subtalar y en la primera metatarsfalángica, facilitando la activación eficiente del mecanismo de windlass durante la fase de despegue. Esta mayor libertad articular posibilita una transición progresiva desde la absorción de impacto hacia la rigidez propulsiva, fenómeno esencial para la economía mecánica. Lieberman et al. (2010) señalaron que los patrones descalzos se asocian con ajustes espontáneos en el apoyo —frecuentemente de mediopié o antepié— que modulan la magnitud del impacto vertical inicial. En contraste, el calzado rígido tiende a condicionar el patrón de apoyo hacia configuraciones más homogéneas, lo que podría limitar la variabilidad adaptativa en edades tempranas.

La cinética comparada revela diferencias relevantes en la tasa de carga vertical y en los momentos rotacionales. En deportes con calzado de tacos, el incremento del coeficiente de fricción con la superficie aumenta la capacidad de generar fuerza horizontal, pero también eleva el momento torsional transmitido proximalmente hacia rodilla y cadera (Nigg et al., 2015). En el niño, cuyas placas de crecimiento permanecen abiertas, estas cargas rotacionales adquieren especial importancia biomecánica, ya que la distribución desigual de fuerzas puede influir en procesos de remodelación estructural.

Desde la perspectiva baropodométrica, la práctica descalza suele mostrar una distribución más uniforme de presiones plantares, favoreciendo la participación coordinada de retropié, mediopié y antepié. Rao y Joseph (1992) observaron que poblaciones infantiles con mayor tiempo de exposición descalza presentaban menor prevalencia de pie plano flexible, sugiriendo una posible relación entre activación muscular sostenida y consolidación del arco. Aunque no se puede

establecer causalidad directa, estos hallazgos respaldan la hipótesis de que la estimulación mecánica variada contribuye a la organización estructural del pie.

El componente propioceptivo constituye otra dimensión crítica. La interacción directa entre la planta del pie y el entorno incrementa la retroalimentación sensorial cutánea y profunda, optimizando la integración aferente-eferente en el sistema nervioso central. La reducción de esta estimulación mediante barreras rígidas puede modificar la calidad del aprendizaje motor, particularmente en fases sensibles del desarrollo neuromotor.

En deportes como la gimnasia artística —practicada tradicionalmente descalza— la estabilidad dinámica depende en gran medida del control intrínseco del pie y de la capacidad de adaptación instantánea a superficies de apoyo variables, como la viga o el suelo elástico de competencia. En contraste, en disciplinas como el fútbol, el uso de guayos rígidos prioriza la eficiencia de tracción en césped natural o sintético, optimizando el rendimiento específico pero alterando el patrón natural de deformación plantar.

Desde un enfoque mecanobiológico, la estimulación intermitente de baja magnitud favorece la diferenciación celular osteoblástica, mientras que cargas excesivamente concentradas pueden generar microestrés acumulativo (Frost, 1994). La diferencia entre ambos contextos radica no solo en la magnitud de la carga, sino en su variabilidad temporal.

La economía de carrera, entendida como la relación entre consumo energético y velocidad, puede beneficiarse de una mayor rigidez longitudinal proporcionada por calzado estructurado. Sin embargo, esta ventaja funcional en el corto plazo debe ponderarse frente a la necesidad de fortalecer estructuras activas en etapas formativas.

La variabilidad motora constituye un indicador esencial de maduración neuromuscular y adaptabilidad del sistema locomotor en la infancia. En contextos de práctica descalza, el sistema nervioso central se ve obligado a ajustar continuamente los patrones de activación muscular ante microvariaciones del terreno, generando oscilaciones controladas del centro de presión y modificaciones sutiles en la secuencia de activación intrínseca-

extrínseca del pie. Esta variabilidad no debe interpretarse como ineficiencia, sino como expresión de plasticidad funcional y exploración motora, fenómeno clave durante etapas sensibles del desarrollo (Lieberman et al., 2010). En contraste, el calzado rígido tiende a reducir la libertad adaptativa mediante la contención mecánica del retropié y la limitación parcial del mediopié, lo que puede homogeneizar los patrones de apoyo. Si bien esta homogeneización puede mejorar la estabilidad en situaciones de alta demanda competitiva, podría disminuir la riqueza sensoriomotora necesaria para consolidar patrones motores versátiles durante la niñez.

Desde la epidemiología de lesiones deportivas en población pediátrica, la literatura no respalda una postura dicotómica que clasifique el deporte descalzo como intrínsecamente protector o el calzado rígido como inherentemente lesivo. Más bien, los estudios sugieren que el riesgo depende de la interacción multifactorial entre volumen de entrenamiento, intensidad, superficie, maduración biológica y características individuales (Nigg et al., 2015). En este sentido, el uso de guayos con alta tracción puede incrementar momentos torsionales en rodilla durante cambios bruscos de dirección, mientras que la práctica descalza en superficies inadecuadas podría aumentar el riesgo de contusiones o sobrecarga metatarsal si no existe adaptación progresiva. Por tanto, la variable crítica no es exclusivamente el tipo de calzado, sino la dosificación y el contexto biomecánico en el que se utiliza.

El modelo de exposición progresiva propone alternar estímulos mecánicos con el fin de optimizar la adaptación estructural sin generar sobrecarga acumulativa. Desde la perspectiva mecanobiológica descrita por Frost (1994), el tejido óseo responde favorablemente a cargas intermitentes dentro de una “ventana de adaptación” específica; cargas por debajo de este umbral no inducen remodelación significativa, mientras que cargas excesivas pueden generar microdaño. La práctica combinada —sesiones de entrenamiento con menor soporte estructural y uso específico de calzado rígido en competencia— podría ofrecer un equilibrio entre fortalecimiento activo y rendimiento funcional, favoreciendo la consolidación del arco plantar y la eficiencia propulsiva sin comprometer estructuras inmaduras.

La coactivación muscular intrínseca observada en condiciones descalzas representa un componente determinante en la regulación de la rigidez adaptativa del arco longitudinal medial. La activación simultánea del abductor hallucis, los interóseos y el flexor digitorum brevis contribuye a generar un sistema de soporte dinámico que complementa la tensión pasiva de la fascia plantar. Kelly et al. (2012) señalaron que esta activación incrementa en tareas de equilibrio y propulsión cuando el pie no recibe asistencia externa estructural. En la infancia, donde la arquitectura ligamentaria aún presenta mayor elasticidad relativa, este refuerzo muscular activo puede desempeñar un papel crucial en la configuración progresiva de la bóveda plantar.

Por el contrario, el calzado rígido incrementa la estabilidad externa mediante placas plantares poco deformables y contrafuertes firmes que restringen la excursión del retropié. Esta contención mecánica puede reducir la amplitud de eversión subtalar y modificar la secuencia de acoplamiento entre tibia y calcáneo durante la fase de apoyo. Aunque esta característica resulta ventajosa en deportes que demandan aceleraciones rápidas y cambios direccionales explosivos, también podría disminuir la exigencia de control neuromuscular fino. En términos adaptativos, la reducción crónica de dicha exigencia podría influir en la capacidad del sistema para responder a perturbaciones inesperadas en contextos no estructurados.

En el pie infantil, la remodelación ósea está estrechamente vinculada a microdeformaciones repetidas que estimulan la actividad osteoblástica en zonas de carga predominante. Frost (1994) explicó que el hueso en crecimiento responde a patrones específicos de tensión y compresión reorganizando su arquitectura interna. En deportes descalzos, la variabilidad direccional de fuerzas genera estímulos distribuidos que podrían favorecer una orientación trabecular más diversa. En cambio, el uso continuo de calzado rígido con diseño estructural fijo podría concentrar cargas en regiones específicas del antepié, particularmente bajo las cabezas metatarsales asociadas al patrón de apoyo predominante.

Desde la neurofisiología del equilibrio, la estimulación plantar directa desempeña un papel esencial en la modulación de reflejos posturales. Los

mecanorreceptores cutáneos y articulares transmiten información aferente que contribuye al ajuste fino del tono muscular en tiempo real. La práctica descalza, al maximizar esta entrada sensorial, puede fortalecer la integración sensoriomotora y optimizar la sincronización intermuscular en tareas dinámicas. La reducción de dicha estimulación mediante barreras rígidas no elimina la retroalimentación, pero sí modifica su intensidad y calidad, lo cual podría influir en procesos de aprendizaje motor durante etapas formativas.

La interacción entre superficie y tipo de calzado también altera la transmisión de energía mecánica hacia segmentos proximales. En condiciones de alta fricción, como ocurre con guayos en césped, la energía rotacional generada en el pie puede transmitirse con mayor intensidad hacia rodilla y cadera si el pie permanece anclado al suelo durante un giro. Nigg et al. (2015) señalaron que la comprensión de la relación entre calzado y lesión debe contemplar la totalidad del sistema cinético en cadena. En el niño, cuya coordinación intersegmentaria aún está en consolidación, esta transmisión energética requiere especial consideración.

Una alternancia planificada entre contextos de práctica podría representar una estrategia pedagógica y preventiva adecuada. La exposición controlada a estímulos descalzos favorecería el fortalecimiento intrínseco y la sensibilidad propioceptiva, mientras que el uso específico de calzado rígido en competencia permitiría optimizar tracción y rendimiento sin generar dependencia estructural permanente. Este enfoque integrador coincide con modelos contemporáneos de entrenamiento que priorizan la diversidad de estímulos como herramienta para promover resiliencia musculoesquelética.

Es fundamental comprender que el pie infantil no constituye una versión reducida del pie adulto, sino un sistema en transformación progresiva donde cartílago, hueso y tejido conectivo interactúan bajo principios de adaptación biológica. La toma de decisiones en torno al uso de calzado rígido debe considerar edad biológica, volumen de práctica y características individuales del arco plantar. La aplicación indiscriminada de modelos de rendimiento adulto en etapas formativas podría ignorar la singularidad del proceso madurativo.

En síntesis, la comparación entre deportes descalzos y con calzado rígido debe interpretarse como un continuo adaptativo más que como una oposición absoluta. La evidencia disponible sugiere que la variabilidad controlada, la progresión gradual de cargas y la contextualización según etapa de crecimiento constituyen principios fundamentales para favorecer un desarrollo morfofuncional equilibrado del pie en crecimiento (Frost, 1994; Kelly et al., 2012; Nigg et al., 2015). El desafío no radica en eliminar uno u otro contexto, sino en integrar ambos de manera estratégica, priorizando la salud estructural y neuromuscular del niño sin descuidar las demandas específicas del deporte practicado.

La siguiente tabla presenta una comparación cuantitativa de variables biomecánicas, cinéticas, cinemáticas y electromiográficas observadas en población infantil durante la práctica deportiva en condiciones descalzas y con calzado rígido de alta tracción. Su propósito es ofrecer un marco analítico objetivo que permita comprender cómo la modificación del entorno mecánico — ya sea mediante la interacción directa pie-superficie o a través de estructuras externas rígidas— influye en la distribución de cargas, la activación neuromuscular, la movilidad articular y la rigidez funcional del complejo pie-tobillo. Los valores reportados deben interpretarse dentro del contexto del crecimiento biológico, considerando que el pie infantil se encuentra en un proceso dinámico de maduración estructural y adaptación mecanobiológica, lo que implica que pequeñas variaciones en la magnitud, dirección o frecuencia de las fuerzas pueden tener implicaciones relevantes en el desarrollo morfofuncional a mediano y largo plazo.

Tabla 5.

Variable biomecánica	Unidad	Deporte descalzo	Con calzado rígido (guayo)	Implicación biomecánica
Ángulo máximo de eversión subtalar	°	6°–12°	4°–8°	Mayor movilidad adaptativa descalzo; restricción mecánica parcial con contrafuerte rígido

Dorsiflexión 1ª MTF en despegue	°	45°–60°	30°–45°	Mayor activación del mecanismo windlass en condiciones sin restricción
Tiempo de contacto (sprint corto)	ms	200–240 ms	170–210 ms	Mayor tracción reduce tiempo de apoyo pero aumenta carga instantánea
Tasa de carga vertical	BW/s	30–55 BW/s	45–75 BW/s	Mayor pendiente de carga en superficie con tacos
Pico de fuerza de reacción vertical	BW	1.8–2.5 BW	2.0–2.8 BW	Incremento leve asociado a mayor rigidez estructural
Momento rotacional tibial interno	Nm/kg	0.10–0.18	0.18–0.30	Mayor fricción incrementa torque transmitido proximalmente
Presión plantar máxima antepié	kPa	180–300	250–400	Concentración de cargas bajo cabezas metatarsales
Presión mediopié	kPa	60–120	40–90	Menor activación del mediopié con placa rígida
Trabajo elástico del arco longitudinal	J/kg	0.10–0.25	0.05–0.15	Mayor almacenamiento/liberación de energía sin rigidez externa
Actividad EMG abductor hallucis	% MVIC	35–55%	20–35%	Mayor demanda estabilizadora intrínseca descalzo
Actividad EMG tibial posterior	% MVIC	40–65%	30–50%	Reducción relativa por soporte externo
Coefficiente de fricción rotacional	—	0.5–0.7	0.8–1.2	Mayor fijación al suelo con tacos
Variabilidad del paso (coeficiente variación)	%	3–6%	1–3%	Mayor adaptabilidad motora en condiciones descalzas
Oscilación mediolateral CoP	mm	6–12 mm	3–8 mm	Mayor exploración sensoriomotora descalzo
Rigidez longitudinal funcional del pie	kN/m	8–14	12–20	Aumento de rigidez estructural con placa rígida

La interpretación global de la tabla cuantitativa permite identificar un patrón consistente: la práctica deportiva descalza se asocia con mayor movilidad

articular, mayor variabilidad motora y mayor activación de la musculatura intrínseca plantar, mientras que el uso de calzado rígido con alta tracción incrementa la rigidez funcional externa, la tasa de carga vertical y los momentos rotacionales transmitidos proximalmente. Desde una perspectiva biomecánica del desarrollo, estos hallazgos sugieren que el contexto descalzo favorece la estimulación mecanobiológica distribuida y la participación activa del sistema neuromuscular en la estabilización del arco longitudinal medial, evidenciada por mayores porcentajes de activación electromiográfica y mayor trabajo elástico del arco. En contraste, la reducción del tiempo de contacto y el aumento del coeficiente de fricción en el calzado rígido optimizan variables asociadas al rendimiento (aceleración y tracción), pero incrementan la magnitud y velocidad de aplicación de fuerzas, particularmente en maniobras rotacionales, lo que podría elevar la carga torsional sobre estructuras en crecimiento si la exposición es prolongada y no dosificada.

Desde el punto de vista fisiológico y adaptativo, la tabla sugiere que ambos contextos generan estímulos mecánicos distintos que inducen adaptaciones específicas. La mayor presión plantar focalizada en antepié y el incremento de rigidez longitudinal con guayos indican una redistribución de cargas que puede modificar el patrón de remodelación ósea y la activación muscular relativa. Por su parte, la mayor oscilación mediolateral del centro de presión y la mayor variabilidad del paso en condiciones descalzas reflejan un entorno de aprendizaje sensoriomotor más rico, potencialmente beneficioso durante etapas sensibles del neurodesarrollo. En consecuencia, el análisis no respalda una postura excluyente, sino una lectura integradora: la alternancia estratégica y la dosificación progresiva podrían permitir aprovechar los beneficios neuromusculares del estímulo descalzo sin renunciar a las ventajas funcionales del calzado rígido en situaciones competitivas específicas, siempre considerando la edad biológica y el volumen de exposición acumulada.





CAPITULO IV

RIESGOS DEL USO DE GUAYOS EN NIÑOS



Problemas ortopédicos: juanetes, pie plano y deformaciones estructurales

El pie humano constituye una estructura anatómica altamente especializada compuesta por 26 huesos, 33 articulaciones y más de un centenar de músculos, tendones y ligamentos que interactúan dinámicamente para permitir soporte de carga, absorción de impacto y propulsión eficiente. Durante la infancia y adolescencia, estas estructuras se encuentran en proceso de osificación progresiva, maduración cartilaginosa y reorganización ligamentaria, lo que las hace particularmente susceptibles a influencias mecánicas externas (Staheli, 2018). La plasticidad estructural del pie en crecimiento implica que las cargas repetitivas, las alteraciones en la alineación biomecánica o el uso inadecuado de calzado pueden generar modificaciones morfológicas que, con el tiempo, se consolidan como deformidades ortopédicas permanentes. Este fenómeno es especialmente relevante cuando se analiza la génesis de alteraciones como el hallux valgus, el pie plano persistente y las deformaciones del retropié, cuyo desarrollo no puede comprenderse sin considerar la interacción entre factores genéticos, mecánicos y ambientales.

El hallux valgus juvenil representa una deformidad tridimensional progresiva del primer radio que involucra desviación lateral del primer dedo, medialización del primer metatarsiano y rotación axial asociada, generando alteraciones sustanciales en la arquitectura del antepié y en la biomecánica de la articulación metatarsofalángica. Aunque su expresión clínica suele intensificarse en la adultez, la evidencia contemporánea indica que los cambios estructurales iniciales pueden manifestarse durante la adolescencia temprana, particularmente en presencia de antecedentes familiares y factores biomecánicos predisponentes (Nix et al., 2012). La progresión angular se correlaciona con desequilibrios en la musculatura intrínseca, especialmente entre el abductor hallucis y el aductor hallucis, cuya alteración compromete la estabilidad dinámica del primer radio durante la fase propulsiva de la marcha.

Desde la perspectiva biomecánica funcional, la desviación del hallux altera el mecanismo de windlass descrito por Hicks, el cual es esencial para la transformación del pie flexible en una estructura rígida durante la fase de despegue. La pérdida de alineación adecuada del primer dedo reduce la tensión

efectiva de la fascia plantar, comprometiendo la rigidez del arco medial y disminuyendo la eficiencia propulsiva (Kitaoka et al., 2018). Esta alteración genera adaptaciones compensatorias proximales, incluyendo incremento de rotación interna tibial y cambios en la cinemática de la rodilla, lo que evidencia la interdependencia entre segmentos distales y proximales dentro de la cadena cinética cerrada.

A nivel histopatológico, el hallux valgus se asocia con remodelación ósea adaptativa, hipertrofia capsular medial y formación progresiva de exostosis secundarias a estrés mecánico crónico sobre la eminencia medial del primer metatarsiano. La persistencia de fricción y compresión genera inflamación de la bursa adyacente, dolor mecánico y limitación funcional progresiva (Bouchard et al., 2014). Cuando la deformidad se instaura antes del cierre de las placas epifisarias, la remodelación puede consolidarse estructuralmente, dificultando la corrección conservadora y aumentando la probabilidad de intervención quirúrgica futura.

El pie plano flexible infantil constituye una condición caracterizada por la disminución del arco longitudinal medial durante la carga, con recuperación parcial en descarga, reflejando una interacción compleja entre laxitud ligamentaria, debilidad muscular e inmadurez estructural. Durante los primeros años de vida, la presencia de tejido adiposo plantar y la elasticidad ligamentaria generan una apariencia fisiológica de aplanamiento; sin embargo, su persistencia más allá de la niñez temprana puede asociarse con sintomatología dolorosa, fatiga y alteraciones en la mecánica de la marcha (Evans, 2008). La diferenciación clínica entre variantes fisiológicas y patológicas requiere evaluación detallada del valgo calcáneo, movilidad subtalar y capacidad de formación del arco en puntillas.

La fisiopatología del pie plano persistente involucra insuficiencia funcional del músculo tibial posterior, estructura clave en el soporte dinámico del arco medial, así como hiperlaxitud ligamentaria generalizada que compromete la estabilidad pasiva del mediopié. El aumento del valgo calcáneo incrementa la pronación subtalar y desplaza medialmente el centro de presión durante la marcha, generando sobrecarga en estructuras plantares y tendinosas (Chen et al., 2019).

Este patrón altera la eficiencia biomecánica global y puede predisponer a dolor crónico en etapas posteriores del desarrollo.

La pronación excesiva asociada al pie plano genera rotación interna tibial aumentada durante la fase de apoyo, modificando la alineación femoropatelar y alterando la distribución de cargas en la articulación de la rodilla. Esta relación ha sido ampliamente documentada en estudios de análisis tridimensional de la marcha, los cuales evidencian cambios en parámetros espaciotemporales y cinemáticos en individuos con colapso del arco medial (Perry & Burnfield, 2010). La alteración distal, por tanto, no se limita al pie, sino que repercute en la mecánica global del miembro inferior.

Epidemiológicamente, la prevalencia del pie plano en población pediátrica varía entre 14% y 24%, dependiendo de los criterios diagnósticos y del rango etario evaluado (Chen et al., 2019). Esta variabilidad refleja diferencias metodológicas y la dificultad de establecer parámetros universales para una estructura en constante transformación. No obstante, existe consenso en que el pie plano sintomático requiere intervención orientada a fortalecimiento intrínseco, control neuromuscular y educación postural.

Las deformaciones del retropié, particularmente el valgo calcáneo excesivo, alteran la congruencia articular subtalar y modifican la orientación del eje de Henke, afectando la estabilidad mediolateral del pie. Esta alteración incrementa la movilidad pronadora y puede predisponer a esguinces recurrentes y microtraumatismos acumulativos en tejidos periarticulares (Whitford & Esterman, 2007). La repetición de estos eventos puede consolidar patrones de inestabilidad crónica.

La remodelación ósea durante el crecimiento responde a principios de mecanotransducción descritos por la ley de Wolff, según la cual el hueso se adapta a las cargas que recibe. Cuando la distribución de fuerzas es anómala o desproporcionada, la adaptación puede derivar en deformidad estructural progresiva. Este principio explica por qué ciertas alteraciones ortopédicas tienden a consolidarse durante la adolescencia si no se corrigen oportunamente mediante intervenciones conservadoras basadas en evidencia.

Las deformaciones del antepié en población pediátrica, tales como el metatarso aducto persistente, los dedos en garra y las desviaciones digitales secundarias a desequilibrios musculotendinosos, constituyen expresiones estructurales complejas que reflejan la interacción dinámica entre predisposición genética, estímulos mecánicos repetitivos y procesos adaptativos óseos durante el crecimiento. El metatarso aducto se caracteriza por una desviación medial del antepié respecto al retropié, generando una convexidad lateral visible y alteraciones en la distribución plantar de cargas. Cuando esta condición persiste más allá de la primera infancia, puede modificar el patrón de apoyo durante la marcha, favoreciendo compensaciones subtalares y alteraciones en la cinemática tibial. Estudios clínicos sugieren que la persistencia de esta deformidad se asocia con restricciones en la movilidad tarsometatarsiana y desequilibrios en la activación de la musculatura intrínseca del pie (Staheli, 2018), lo que subraya la importancia de una evaluación temprana orientada a determinar flexibilidad estructural y potencial de corrección conservadora.

Los dedos en garra y en martillo representan deformidades digitales progresivas que implican hiperextensión de las articulaciones metatarsofalángicas y flexión de las interfalángicas proximales o distales, configurando un patrón de retracción tendinosa que altera significativamente la biomecánica del antepié. Estas alteraciones pueden originarse por desequilibrios entre la musculatura flexora y extensora, particularmente cuando la musculatura intrínseca es incapaz de estabilizar adecuadamente los radios metatarsianos durante la fase de apoyo. La persistencia de fuerzas compresivas sobre las cabezas metatarsianas incrementa el riesgo de metatarsalgia y formación de hiperqueratosis plantares, lo que evidencia la naturaleza progresiva de estas deformidades cuando no se intervienen oportunamente (Kitaoka et al., 2018). Desde una perspectiva funcional, la alteración digital compromete la capacidad de adaptación del antepié a superficies irregulares y reduce la eficiencia de la propulsión durante la marcha.

La influencia de factores genéticos en la aparición de deformidades ortopédicas del pie ha sido ampliamente documentada, particularmente en el caso del hallux valgus juvenil, donde la agregación familiar sugiere un componente hereditario significativo. Investigaciones genéticas han identificado patrones de herencia

autosómica dominante con penetrancia variable, lo que implica que la expresión fenotípica depende también de factores ambientales y mecánicos (Nix et al., 2012). La interacción entre predisposición genética y exposición a cargas biomecánicas específicas durante etapas críticas del crecimiento puede acelerar la progresión angular y consolidar patrones estructurales anómalos antes del cierre epifisario.

El uso prolongado de calzado restrictivo durante etapas de desarrollo constituye un factor ambiental que puede modificar la morfología del antepié al limitar la expansión transversal fisiológica y alterar la alineación digital natural. La compresión lateral sostenida favorece la desviación progresiva del hallux y altera la distribución de presiones plantares, incrementando el estrés mecánico sobre la eminencia medial del primer metatarsiano. Estudios biomecánicos han demostrado que la restricción del espacio digital modifica la activación muscular intrínseca y reduce la capacidad adaptativa del pie frente a cargas dinámicas (Mickle et al., 2016). Este fenómeno adquiere especial relevancia en contextos donde el pie aún no ha completado su maduración estructural.

Desde el punto de vista de la cadena cinética posterior, las deformidades estructurales del pie generan modificaciones ascendentes que pueden influir en la alineación global del miembro inferior. La pronación excesiva asociada a colapso del arco medial incrementa la rotación interna tibial y altera la biomecánica de la articulación femorotibial, favoreciendo patrones compensatorios que pueden manifestarse como genu valgo funcional. Esta alteración proximal modifica la distribución de cargas en la cadera y puede influir en la estabilidad pélvica durante la marcha (Perry & Burnfield, 2010). La comprensión de estas interacciones resulta esencial para evitar abordajes terapéuticos aislados que no consideren la integración sistémica del aparato locomotor.

La adaptación neuromuscular frente a deformidades estructurales implica cambios en los patrones de activación y sincronización muscular, particularmente en la musculatura estabilizadora del tobillo y del arco plantar. La debilidad del tibial posterior y del abductor hallucis reduce la capacidad de soporte dinámico del arco medial, mientras que la hiperactividad compensatoria

de los peroneos puede perpetuar la pronación excesiva. Estudios electromiográficos han evidenciado alteraciones en la secuencia temporal de activación muscular en individuos con pie plano sintomático, lo que sugiere una reorganización adaptativa del control motor (Whitford & Esterman, 2007). Esta reorganización, aunque inicialmente compensatoria, puede convertirse en un patrón disfuncional crónico si no se interviene adecuadamente.

El diagnóstico integral de deformidades ortopédicas del pie requiere una evaluación clínica minuciosa que incluya inspección estática, análisis dinámico de la marcha, pruebas funcionales y, cuando sea pertinente, estudios radiográficos con carga. La medición de ángulos como el intermetatarsiano, el ángulo talocalcáneo y el índice de arco plantar proporciona información cuantitativa sobre la severidad de la deformidad. Sin embargo, la correlación entre hallazgos radiográficos y sintomatología clínica no siempre es lineal, lo que obliga a integrar parámetros funcionales en la toma de decisiones terapéuticas (Bouchard et al., 2014). Este enfoque multidimensional permite individualizar estrategias de intervención y evitar sobretamientos.

Las consecuencias a largo plazo de deformidades no tratadas pueden incluir degeneración articular temprana, alteraciones en la distribución de cargas y desarrollo de síndromes dolorosos crónicos. La persistencia de desalineaciones durante etapas críticas del crecimiento puede consolidar patrones estructurales que incrementen el riesgo de artrosis en la adultez temprana. Estudios longitudinales han mostrado asociación entre pie plano sintomático en la adolescencia y mayor incidencia de dolor musculoesquelético en etapas posteriores (Evans, 2008). Estos hallazgos refuerzan la necesidad de estrategias preventivas basadas en evidencia.

La intervención conservadora basada en fortalecimiento de musculatura intrínseca, ejercicios propioceptivos y reeducación postural ha demostrado efectos positivos en la mejora de la altura del arco medial y en la reducción de sintomatología dolorosa. Programas estructurados que integran ejercicios de “short foot” y control neuromuscular han evidenciado cambios significativos en parámetros baropodométricos y en la estabilidad dinámica (Mickle et al., 2016).

La aplicación temprana de estas estrategias puede modificar el curso evolutivo de ciertas deformidades, evitando progresión estructural irreversible.

En conjunto, los problemas ortopédicos del pie en población pediátrica deben comprenderse como fenómenos multifactoriales donde convergen predisposición genética, estímulos mecánicos, adaptación neuromuscular y procesos de remodelación ósea propios del crecimiento. La visión reduccionista centrada exclusivamente en la morfología estructural resulta insuficiente para explicar la complejidad funcional del pie en desarrollo. La evidencia científica contemporánea subraya la necesidad de enfoques integrales que contemplen prevención, detección temprana e intervención basada en principios biomecánicos sólidos (Staheli, 2018). Solo mediante una comprensión sistémica y longitudinal es posible mitigar el impacto de estas deformidades sobre la calidad de vida y la funcionalidad futura del individuo.

Lesiones Musculares y Tendinosas Frecuentes

Las lesiones musculares y tendinosas del miembro inferior en población pediátrica y adolescente constituyen un fenómeno clínico de creciente relevancia debido al incremento en la participación deportiva temprana y a la exposición repetitiva a cargas mecánicas de alta intensidad durante etapas de inmadurez estructural. A diferencia del adulto, el tejido musculotendinoso en crecimiento presenta características histológicas particulares, incluyendo mayor contenido hídrico, variaciones en la organización colágena y menor rigidez tensil, lo que modifica su respuesta frente al estrés mecánico acumulativo (DiFiori et al., 2014). La interacción entre carga externa, capacidad adaptativa tisular y control neuromuscular determina el equilibrio entre adaptación fisiológica y lesión, siendo este último escenario más probable cuando se superan los umbrales biológicos de recuperación.

La tendinopatía aquilea representa una de las patologías más frecuentes en jóvenes físicamente activos, caracterizada por dolor localizado en el tercio medio o insercional del tendón de Aquiles, engrosamiento estructural y alteraciones degenerativas de la matriz extracelular. Contrario a la concepción tradicional inflamatoria, la evidencia histopatológica contemporánea indica que se trata de un proceso degenerativo no inflamatorio, conocido como tendinosis, donde

predominan desorganización fibrilar, neovascularización y aumento de proteoglicanos (Cook & Purdam, 2009). La repetición de cargas excéntricas durante actividades de salto y carrera genera microtraumatismos que, en ausencia de recuperación adecuada, favorecen cambios estructurales progresivos.

Desde el punto de vista biomecánico, la sobrecarga del tendón de Aquiles se relaciona con alteraciones en la alineación del retropié, particularmente pronación excesiva asociada a pie plano persistente, que incrementa la tensión rotacional sobre el complejo gastrocnemio-sóleo. La modificación del eje subtalar altera la trayectoria de fuerzas transmitidas al tendón, generando un patrón de estrés asimétrico que favorece degeneración focal (Maffulli et al., 2011). Esta relación evidencia la estrecha conexión entre deformidades estructurales y lesiones tendinosas por sobreuso.

La fascitis plantar, aunque más estudiada en adultos, también puede presentarse en adolescentes sometidos a cargas repetitivas, especialmente cuando coexisten alteraciones biomecánicas del arco longitudinal medial. El incremento sostenido de tensión sobre la fascia plantar produce microdesgarros en su inserción calcánea, acompañados de cambios degenerativos similares a los observados en tendinopatías (Riddle et al., 2003). El dolor matutino característico se asocia con rigidez fascial posterior al reposo, fenómeno vinculado a la reorganización colágena durante la fase de descarga nocturna.

Las lesiones musculares del complejo gastrocnemio-sóleo constituyen otra entidad frecuente en jóvenes deportistas, particularmente en disciplinas que implican aceleraciones y desaceleraciones repetidas. La desproporción entre fuerza generada y capacidad elástica muscular puede desencadenar microdesgarros fibrilares, especialmente en contextos de fatiga acumulada. La inmadurez en la coordinación intermuscular incrementa la probabilidad de activaciones asincrónicas que comprometen la eficiencia amortiguadora del sistema musculotendinoso (Gruber et al., 2013).

La interacción entre fatiga neuromuscular y control motor central desempeña un papel determinante en la génesis de lesiones por sobreuso. A medida que progresa la fatiga, disminuye la capacidad del sistema nervioso central para

modular adecuadamente la activación muscular, lo que incrementa la carga transferida a estructuras pasivas como tendones y ligamentos. Este fenómeno ha sido documentado en estudios electromiográficos que muestran alteraciones en la sincronización y amplitud de activación bajo condiciones de fatiga inducida (DiFiori et al., 2014).

Las lesiones del tibial posterior, aunque menos frecuentes en niños pequeños, pueden observarse en adolescentes con pronación excesiva persistente. Este músculo desempeña un papel esencial en el soporte dinámico del arco medial, y su disfunción genera colapso progresivo del mediopié. La insuficiencia funcional prolongada puede evolucionar hacia tendinopatía crónica, exacerbando deformidades estructurales preexistentes (Maffulli et al., 2011).

La apofisitis calcánea, conocida como enfermedad de Sever, constituye una patología frecuente en población en crecimiento, asociada a tracción repetitiva del tendón de Aquiles sobre el núcleo de osificación calcáneo. La vulnerabilidad de la placa de crecimiento frente a fuerzas tensionales explica la aparición de dolor posterior en el talón durante etapas de rápido crecimiento (DiFiori et al., 2014). Esta entidad ilustra la particular susceptibilidad del esqueleto inmaduro frente a cargas mecánicas repetitivas.

Desde una perspectiva histológica, el proceso de lesión tendinosa implica desorganización del colágeno tipo I, incremento de colágeno tipo III y alteración en la disposición paralela de las fibras, reduciendo la resistencia tensil del tejido. La neovascularización y la proliferación de tenocitos reflejan un intento adaptativo fallido de reparación tisular (Cook & Purdam, 2009). Estos cambios estructurales explican la persistencia del dolor y la disminución de la capacidad funcional.

El diagnóstico de lesiones musculotendinosas requiere integración de hallazgos clínicos, pruebas funcionales y, cuando es necesario, estudios de imagen como ecografía musculoesquelética o resonancia magnética. La ecografía permite evaluar engrosamiento, neovascularización y discontinuidad fibrilar, constituyéndose en herramienta accesible y de alta utilidad clínica. Sin embargo, la correlación imagen-síntoma debe interpretarse con cautela, dado que pueden existir hallazgos estructurales en individuos asintomáticos (Maffulli et al., 2011).

La progresión inadecuada de cargas en programas de entrenamiento infantil constituye uno de los principales determinantes en la génesis de lesiones musculotendinosas por sobreuso, particularmente cuando no se respetan los principios de adaptación biológica gradual descritos en fisiología del ejercicio. El tejido tendinoso, compuesto predominantemente por colágeno tipo I organizado en fascículos paralelos, requiere estímulos mecánicos dosificados para inducir remodelación estructural positiva; sin embargo, cuando la carga excede la capacidad adaptativa, se produce desorganización fibrilar, incremento de colágeno tipo III y reducción de la rigidez tensil, fenómenos que disminuyen la eficiencia mecánica del tendón (Malliaras et al., 2013). En población pediátrica, donde las placas de crecimiento y los núcleos de osificación aún no han completado su maduración, la vulnerabilidad frente a tracciones repetitivas es mayor, lo que explica la incidencia significativa de lesiones apofisarias y tendinopatías insercionales en contextos de entrenamiento intensivo no periodizado.

El ejercicio excéntrico controlado se ha consolidado como una de las intervenciones terapéuticas con mayor respaldo científico en el manejo de tendinopatías, debido a su capacidad para estimular reorganización colágena y mejorar la capacidad tensil del tejido lesionado. Los mecanismos subyacentes incluyen aumento en la síntesis de colágeno tipo I, reducción de neovascularización patológica y modulación de la percepción nociceptiva mediante adaptación neurosensorial (Malliaras et al., 2013). En adolescentes, la implementación de protocolos excéntricos debe considerar la etapa de desarrollo puberal, ya que los cambios hormonales influyen en la plasticidad tisular y en la capacidad de recuperación. La dosificación adecuada del volumen e intensidad resulta fundamental para evitar exacerbación sintomática y garantizar adaptación progresiva.

La propiocepción y el entrenamiento del control neuromuscular desempeñan un papel central en la prevención secundaria de lesiones musculares y tendinosas, particularmente en individuos con antecedentes de inestabilidad funcional o alteraciones biomecánicas persistentes. La mejora en la sensibilidad aferente de los mecanorreceptores articulares y musculares optimiza la respuesta refleja ante perturbaciones externas, reduciendo la probabilidad de microtraumatismos

repetitivos (Gruber et al., 2013). En población en crecimiento, el sistema nervioso central se encuentra en fase de consolidación de patrones motores, por lo que intervenciones tempranas pueden generar cambios duraderos en la coordinación intermuscular y en la eficiencia de absorción de impactos.

Los factores extrínsecos, tales como superficie de juego, volumen de competencia, tipo de calzado y densidad de entrenamiento semanal, interactúan con variables intrínsecas como alineación estructural, flexibilidad muscular y fuerza relativa para configurar el perfil individual de riesgo lesional. La exposición repetitiva a superficies rígidas incrementa la magnitud de fuerzas de reacción al suelo, transmitiendo mayor carga a estructuras tendinosas del tobillo y del pie. Estudios biomecánicos han demostrado que modificaciones en la rigidez de la superficie pueden alterar la cinemática del tobillo y la activación del complejo gastrocnemio-sóleo, influyendo directamente en la tensión tendinosa (Maffulli et al., 2011). La evaluación integral debe, por tanto, considerar el entorno mecánico donde se desarrolla la actividad física.

El retorno seguro a la actividad deportiva tras una lesión musculotendinosa requiere criterios objetivos que integren evaluación clínica, pruebas funcionales y análisis biomecánico dinámico. La recuperación del rango completo de movimiento, la simetría en fuerza isocinética y la ausencia de dolor bajo carga progresiva constituyen indicadores fundamentales antes de autorizar la reincorporación competitiva. La evidencia indica que el retorno prematuro incrementa significativamente la tasa de recurrencia, especialmente en lesiones del tendón de Aquiles y en desgarros musculares del tríceps sural (Maffulli et al., 2011). En población pediátrica, la prudencia es aún más relevante debido a la vulnerabilidad estructural asociada al crecimiento.

La educación del paciente, la familia y el entorno deportivo representa un componente esencial en la prevención de recaídas, dado que la comprensión de los mecanismos lesionales y de la importancia del descanso favorece la adherencia terapéutica. La cultura de la especialización deportiva temprana y la presión competitiva pueden conducir a la minimización de síntomas iniciales, prolongando procesos degenerativos subclínicos. Investigaciones en medicina deportiva pediátrica resaltan la necesidad de promover estrategias de

diversificación motriz y descanso programado para reducir la incidencia de lesiones por sobreuso (DiFiori et al., 2014). Este enfoque preventivo se alinea con principios de desarrollo atlético a largo plazo.

La interacción entre crecimiento acelerado y desequilibrio muscular constituye un factor crítico en la aparición de lesiones durante la adolescencia, etapa en la cual la longitud ósea puede incrementarse más rápidamente que la adaptación muscular y tendinosa correspondiente. Este desfase temporal genera aumento en la tensión pasiva de estructuras musculotendinosas, particularmente en el complejo gastrocnemio-sóleo y en la fascia plantar, elevando el riesgo de microlesiones repetitivas. Estudios longitudinales han documentado correlación entre picos de crecimiento puberal y mayor incidencia de tendinopatías insercionales (DiFiori et al., 2014). La monitorización del crecimiento somático resulta, por tanto, un elemento estratégico en la planificación de cargas deportivas.

La cronificación de lesiones musculotendinosas implica cambios neuroplásticos a nivel central que pueden perpetuar la percepción de dolor incluso tras la resolución estructural del daño inicial. La sensibilización central y la alteración en la modulación descendente del dolor han sido descritas en casos de tendinopatía persistente, evidenciando la complejidad biopsicosocial de estas condiciones (Cook & Purdam, 2009). En adolescentes, la intervención temprana reduce la probabilidad de instauración de estos mecanismos neurofisiológicos crónicos, subrayando la importancia de abordajes multidimensionales que integren componentes físicos y educativos.

El abordaje interdisciplinario que integra medicina deportiva, fisioterapia, entrenamiento funcional y, cuando es necesario, apoyo psicológico, optimiza la recuperación y disminuye la incidencia de recurrencias. La coordinación entre profesionales permite ajustar cargas, corregir patrones biomecánicos alterados y reforzar estrategias preventivas individualizadas. La literatura contemporánea enfatiza que la intervención aislada centrada únicamente en el tejido lesionado resulta insuficiente para garantizar recuperación sostenible (Malliaras et al., 2013). En consecuencia, el enfoque integral se posiciona como estándar en el manejo moderno de lesiones musculotendinosas.

En síntesis, las lesiones musculares y tendinosas en población pediátrica deben interpretarse como manifestaciones de un desequilibrio multifactorial entre carga mecánica, capacidad adaptativa tisular, maduración neuromuscular y contexto ambiental. La comprensión profunda de los mecanismos biomecánicos y biológicos que subyacen a estas patologías permite diseñar estrategias preventivas basadas en evidencia científica y ajustadas al estadio de desarrollo del individuo. La integración de principios de periodización, fortalecimiento excéntrico, control neuromuscular y educación constituye la base para preservar la integridad musculotendinosa y evitar la progresión hacia cuadros crónicos incapacitantes (Maffulli et al., 2011; DiFiori et al., 2014). Solo mediante una perspectiva longitudinal y sistémica es posible garantizar salud musculoesquelética sostenible durante el crecimiento y la transición hacia la adultez.

Trastornos en la marcha y postura

La marcha humana constituye un patrón motor cíclico altamente complejo que integra componentes neuromusculares, articulares y biomecánicos en una secuencia coordinada destinada a optimizar eficiencia energética, estabilidad y absorción de impactos. Durante la infancia y adolescencia, este patrón se encuentra en proceso de refinamiento progresivo, con consolidación de parámetros espaciotemporales, maduración del control postural y adaptación estructural del sistema osteoarticular. Cualquier alteración en la alineación del pie o en la estabilidad del tobillo puede modificar significativamente la cinemática global del miembro inferior, dado que la marcha se desarrolla en una cadena cinética cerrada donde los segmentos distales influyen directamente sobre estructuras proximales (Perry & Burnfield, 2010). En este contexto, los trastornos de la marcha asociados a deformidades estructurales del pie adquieren relevancia clínica no solo por su impacto funcional inmediato, sino también por su potencial influencia en el desarrollo postural a largo plazo.

La pronación excesiva durante la fase de apoyo medio representa uno de los trastornos biomecánicos más frecuentemente observados en población pediátrica con pie plano persistente. Este patrón se caracteriza por eversión calcánea aumentada, descenso del arco longitudinal medial y rotación interna

tibial incrementada, generando alteraciones en la alineación de la rodilla y en la mecánica femoropatelar. Estudios tridimensionales de análisis de movimiento han demostrado que la pronación sostenida modifica la trayectoria del centro de masa y altera la sincronización entre fases de apoyo y oscilación (Perry & Burnfield, 2010). Estas modificaciones, aunque inicialmente compensatorias, pueden convertirse en patrones disfuncionales crónicos si persisten durante etapas críticas del crecimiento.

La rotación interna tibial aumentada asociada a colapso del arco medial influye directamente en la biomecánica de la articulación femoropatelar, incrementando el estrés compresivo sobre la faceta lateral de la rótula. Este fenómeno ha sido vinculado con mayor incidencia de dolor anterior de rodilla en adolescentes activos, particularmente en aquellos con desequilibrios musculares en el cuádriceps y debilidad del glúteo medio (Barton et al., 2011). La interdependencia entre estructuras distales y proximales evidencia que los trastornos de la marcha no deben abordarse como alteraciones aisladas del pie, sino como manifestaciones sistémicas de desalineación biomecánica.

La marcha en supinación excesiva constituye el patrón opuesto, caracterizado por rigidez aumentada del retropié y disminución en la capacidad de absorción de impactos. Este patrón puede observarse en individuos con arco plantar elevado o con alteraciones en la movilidad subtalar, generando mayor transmisión de fuerzas de reacción al suelo hacia segmentos proximales. La reducción en la fase de pronación fisiológica limita la capacidad adaptativa del pie frente a irregularidades del terreno, incrementando el riesgo de lesiones por sobrecarga (Whitford & Esterman, 2007). La rigidez funcional persistente puede alterar la eficiencia energética de la marcha y predisponer a fatiga precoz.

El desarrollo del control postural en población infantil implica integración progresiva de información visual, vestibular y propioceptiva, permitiendo mantener el equilibrio dinámico durante la locomoción. Alteraciones en la estabilidad del tobillo o en la alineación del pie pueden modificar la retroalimentación sensorial proveniente de mecanorreceptores plantares, afectando la precisión del ajuste postural (Gruber et al., 2013). Este déficit

sensoriomotor puede manifestarse como aumento en la oscilación mediolateral del centro de presión y menor estabilidad en apoyo monopodal.

La hiperlordosis lumbar compensatoria representa una adaptación postural frecuente en individuos con pronación excesiva persistente, donde la rotación interna tibial y la anteversión femoral influyen en la posición pélvica. El incremento en la inclinación anterior de la pelvis altera la alineación vertebral y puede generar sobrecarga en estructuras lumbares posteriores. Estudios electromiográficos han demostrado cambios en la activación de musculatura paravertebral en sujetos con alteraciones podales crónicas (Lee et al., 2016). Esta relación confirma la naturaleza integrada del sistema postural.

La escoliosis funcional leve puede desarrollarse como mecanismo adaptativo frente a discrepancias en la longitud funcional del miembro inferior derivadas de colapso unilateral del arco plantar. Aunque estas curvas suelen ser reversibles con corrección biomecánica, su persistencia durante periodos prolongados puede influir en la simetría muscular y en la distribución de cargas vertebrales. La detección temprana mediante evaluación postural sistemática resulta esencial para evitar progresión estructural.

Los parámetros espaciotemporales de la marcha, incluyendo longitud de paso, cadencia y tiempo de apoyo, pueden verse alterados en presencia de deformidades estructurales del pie. Estudios de laboratorio han documentado reducción en la longitud de zancada y aumento en el tiempo de doble apoyo en niños con pie plano sintomático (Stebbins et al., 2010). Estas adaptaciones reflejan estrategias compensatorias orientadas a incrementar estabilidad, aunque pueden reducir eficiencia locomotora.

La evaluación tridimensional mediante sistemas de captura de movimiento ha permitido identificar patrones cinemáticos específicos asociados a pronación excesiva y valgo calcáneo persistente. El análisis de vectores articulares evidencia incremento en momentos de eversión y alteraciones en la cinética del tobillo durante la fase de apoyo medio. Estos hallazgos respaldan la necesidad de intervenciones tempranas basadas en corrección biomecánica individualizada (Perry & Burnfield, 2010).

Las alteraciones en la marcha infantil asociadas a disfunciones estructurales del pie no solo implican cambios en los parámetros espaciales y temporales del ciclo gait, sino que representan una reorganización global de la coordinación neuromuscular intersegmentaria que puede consolidarse como patrón motor persistente si no es identificada e intervenida de manera temprana. Desde la perspectiva de la biomecánica dinámica, la marcha constituye una sucesión de transiciones controladas entre fases de apoyo y balanceo en las cuales el pie actúa como interfaz sensoriomotora crítica entre el cuerpo y el entorno; por lo tanto, cualquier modificación en su arquitectura o en su comportamiento funcional altera la secuencia cinemática ascendente que involucra tobillo, rodilla, cadera, pelvis y columna vertebral. Estudios tridimensionales de análisis de movimiento han demostrado que niños con pie plano flexible presentan incremento en la rotación interna tibial y en la aducción femoral durante la fase media del apoyo, lo que genera mayores demandas estabilizadoras en la musculatura glútea y peronea (Chen et al., 2018). Esta reorganización compensatoria, si se mantiene en el tiempo, puede traducirse en sobrecarga crónica proximal, modificando no solo la eficiencia mecánica sino también el gasto energético de la marcha, fenómeno que ha sido corroborado mediante mediciones de consumo de oxígeno en poblaciones pediátricas con alteraciones estructurales del pie (Hollander et al., 2019).

En el ámbito postural estático, la presencia de deformidades del retropié como el valgo calcáneo excesivo condiciona una alteración en la alineación subtalar que repercute directamente en la orientación del eje mecánico del miembro inferior, modificando el vector de carga que atraviesa la articulación tibiofemoral y redistribuyendo las fuerzas de compresión medial y lateral. Este fenómeno ha sido descrito en estudios de plataforma de presión y análisis baropodométrico que evidencian desplazamiento del centro de presiones hacia la región medial en niños con pronación persistente, acompañado de incremento en la amplitud de oscilación anteroposterior (Powell et al., 2020). Desde una perspectiva neurofisiológica, esta inestabilidad relativa implica mayor activación tónica de musculatura estabilizadora profunda para mantener el equilibrio en bipedestación, lo que puede traducirse en fatiga muscular precoz y en adaptaciones posturales compensatorias como hiperlordosis lumbar o

protracción escapular. La literatura reciente enfatiza que estos cambios no deben interpretarse como eventos aislados, sino como componentes de una cadena cinética integrada cuya alteración temprana puede condicionar patrones posturales consolidados en la adolescencia (Uden, Scharfbillig & Causby, 2017).

Los trastornos de la marcha en niños con deformidades estructurales también se manifiestan en variaciones del tiempo de apoyo monopodal y en asimetrías intersegmentarias que comprometen la estabilidad dinámica. Investigaciones que utilizan sistemas de captura óptica tridimensional han evidenciado que las asimetrías en el arco plantar se asocian con diferencias significativas en la duración de la fase de contacto inicial y en la propulsión terminal, generando microdesbalances repetitivos que pueden afectar la coordinación intermuscular (Mickle et al., 2019). Estas alteraciones temporales modifican la sincronización entre los grupos musculares agonistas y antagonistas del tobillo, particularmente entre tibial anterior y tríceps sural, incrementando la probabilidad de fatiga y disfunción tendinosa. Desde el enfoque del control motor, tales cambios representan adaptaciones centralmente mediadas en respuesta a entradas aferentes alteradas provenientes de mecanorreceptores plantares, lo que demuestra la profunda interdependencia entre estructura periférica y organización neural central.

La marcha en puntas persistente más allá de la edad esperada constituye otro ejemplo de trastorno funcional que puede vincularse con alteraciones estructurales o con restricciones musculotendinosas del complejo gastrocnemio-sóleo. Si bien en muchos casos puede tener carácter idiopático, la literatura reciente ha señalado que la limitación en la dorsiflexión asociada a rigidez del retropié o a acortamiento adaptativo del tendón de Aquiles altera la secuencia normal de contacto talón-antepié, generando incremento de carga en las cabezas metatarsales y modificaciones en la activación proximal (Engström & Tedroff, 2018). Desde el punto de vista postural, la marcha en equino favorece inclinación anterior del tronco y compensaciones lumbares que pueden convertirse en patrón habitual. El análisis electromiográfico muestra mayor actividad basal del tríceps sural durante la fase de apoyo, lo que sugiere reorganización persistente del esquema motor. Esta interacción entre limitación

estructural y adaptación neuromuscular evidencia la necesidad de abordar el fenómeno desde una perspectiva integral.

La escoliosis funcional secundaria a disimetrías aparentes derivadas de colapso unilateral del arco plantar constituye una manifestación postural compleja que ilustra cómo una alteración distal puede inducir modificaciones axiales significativas. Cuando un pie presenta mayor pronación que el contralateral, se produce descenso relativo de la pelvis ipsilateral, generando inclinación compensatoria de la columna lumbar que puede simular discrepancia real de longitud (Khamis & Yizhar, 2017). Estudios clínicos han mostrado que la corrección del soporte plantar mediante ortesis adecuadas reduce la inclinación pélvica y mejora la alineación lumbar en casos seleccionados, lo que confirma la relación biomecánica directa entre soporte plantar y organización postural global. Este fenómeno refuerza la idea de que el análisis postural en pediatría debe incluir evaluación exhaustiva del pie como elemento fundamental de la base de sustentación.

Desde la perspectiva del equilibrio dinámico, las alteraciones estructurales del pie afectan la capacidad del sistema nervioso para integrar información propioceptiva y vestibular durante tareas de desplazamiento y cambios de dirección. Investigaciones que emplean pruebas de estabilidad en plataforma móvil han encontrado que niños con pie plano presentan mayor desplazamiento del centro de masa y menor eficiencia en estrategias de tobillo durante perturbaciones súbitas (Hollander et al., 2019). Este hallazgo sugiere que la integridad del arco plantar no solo cumple función mecánica, sino también sensorial, actuando como modulador de la retroalimentación aferente que informa al sistema nervioso central sobre la posición y presión plantar. La alteración crónica de esta retroalimentación puede influir en la adquisición de habilidades motoras complejas, especialmente en etapas críticas del desarrollo neuromotor.

La relación entre postura estática prolongada y deformidades estructurales del pie también ha sido objeto de análisis en estudios longitudinales que evalúan la evolución del alineamiento corporal desde la infancia hasta la adolescencia. Se ha observado que niños con pronación persistente tienden a desarrollar patrones

posturales caracterizados por anteversión pélvica aumentada y rotación interna femoral mantenida, configurando un esquema de alineación que incrementa la carga anterior sobre la columna lumbar (Powell et al., 2020). Estas adaptaciones no necesariamente generan dolor en etapas tempranas, pero pueden constituir factores predisponentes para sintomatología musculoesquelética en la adultez joven. El carácter progresivo y silencioso de estas modificaciones resalta la importancia de intervenciones preventivas basadas en evidencia.

En el contexto deportivo infantil, las alteraciones de la marcha asociadas a deformidades del pie pueden amplificarse debido a las mayores demandas de aceleración, frenado y cambio de dirección. Estudios recientes en poblaciones escolares activas han demostrado que la presencia de pie plano flexible se correlaciona con menor eficiencia en la absorción de impacto durante aterrizajes y con mayor valgo dinámico de rodilla (Chen et al., 2018). Esta combinación incrementa el estrés sobre estructuras ligamentarias y musculares proximales, evidenciando que los trastornos de la marcha no son meramente alteraciones estéticas, sino factores biomecánicos con potencial impacto lesivo. El análisis preventivo en contextos deportivos debe, por tanto, incorporar evaluación detallada del patrón de apoyo plantar.

La interacción entre marcha, postura y desarrollo neuromotor implica que las alteraciones estructurales del pie pueden influir en la adquisición de patrones locomotores avanzados como la carrera, el salto y la coordinación bilateral. Estudios observacionales han sugerido que niños con alteraciones severas del arco plantar muestran retrasos leves pero significativos en pruebas de agilidad y equilibrio comparados con pares sin deformidades estructurales (Mickle et al., 2019). Estos hallazgos no implican determinismo funcional, pero sí evidencian que la base estructural condiciona la eficiencia del aprendizaje motor. La plasticidad neural en edades tempranas permite compensaciones, pero la persistencia de estímulos biomecánicos inadecuados puede consolidar patrones menos eficientes.

La evaluación clínica contemporánea de los trastornos de la marcha en pediatría ha incorporado herramientas tecnológicas avanzadas como sistemas de análisis cinético-cinemático tridimensional y electromiografía de superficie, permitiendo

identificar microalteraciones que no son perceptibles mediante observación clínica tradicional. Estas tecnologías han demostrado que incluso deformidades consideradas “leves” pueden generar variaciones medibles en ángulos articulares y tiempos de activación muscular (Engström & Tedroff, 2018). La evidencia acumulada en la última década subraya la importancia de una aproximación diagnóstica integral que combine exploración clínica, análisis instrumental y seguimiento longitudinal para determinar la relevancia funcional real de cada alteración.

En síntesis, los trastornos en la marcha y la postura asociados a deformidades estructurales del pie deben entenderse como fenómenos dinámicos, multifactoriales y evolutivos que trascienden la dimensión local para integrarse en la organización global del sistema musculoesquelético y neuromotor. La evidencia científica reciente converge en señalar que la arquitectura plantar cumple funciones simultáneamente mecánicas, sensoriales y estabilizadoras, y que su alteración durante etapas críticas del desarrollo puede inducir adaptaciones compensatorias ascendentes que afectan eficiencia locomotora, equilibrio y alineación axial (Uden et al., 2017; Hollander et al., 2019). El abordaje clínico contemporáneo exige, por tanto, una perspectiva interdisciplinaria que integre biomecánica, neurodesarrollo y seguimiento longitudinal, priorizando intervenciones tempranas fundamentadas en evidencia con el objetivo de optimizar la función y prevenir complicaciones futuras.

Evidencia científica y estudios clínicos recientes

La investigación contemporánea en ortopedia pediátrica ha experimentado una transición metodológica significativa, pasando de estudios observacionales descriptivos a diseños longitudinales y ensayos clínicos controlados que permiten comprender con mayor precisión la evolución natural de las deformidades del pie y su impacto funcional a largo plazo. En la última década, la incorporación de análisis cinemático tridimensional, plataformas de presión baropodométrica y resonancia magnética musculoesquelética ha posibilitado caracterizar no solo la morfología estructural sino también la dinámica funcional del pie en crecimiento. Estudios prospectivos han demostrado que la persistencia del pie plano más allá de los ocho años se asocia con

modificaciones medibles en la mecánica del retropié y en la rotación tibial durante la fase media del apoyo, evidenciando que ciertas variaciones morfológicas no son simplemente transitorias sino potencialmente estructurales (Chen et al., 2018). Esta evidencia ha contribuido a replantear la noción tradicional de que todas las alteraciones plantares infantiles se corrigen espontáneamente, destacando la necesidad de criterios clínicos más precisos para diferenciar variantes fisiológicas de condiciones patológicas.

Los estudios longitudinales que han seguido cohortes pediátricas durante periodos superiores a cinco años han permitido identificar factores predictivos asociados con la persistencia o progresión de deformidades como el hallux valgus juvenil y el colapso medial del arco plantar. Investigaciones recientes han señalado que variables como índice de masa corporal elevado, laxitud ligamentaria generalizada y antecedentes familiares incrementan la probabilidad de progresión estructural, particularmente cuando se combinan con demandas biomecánicas repetitivas (Powell et al., 2020). Estos hallazgos respaldan la hipótesis multifactorial de las deformidades ortopédicas infantiles, donde la interacción entre predisposición genética y estímulos mecánicos ambientales desempeña un papel determinante. La evidencia también sugiere que la identificación temprana de estos factores permite implementar estrategias preventivas individualizadas que pueden modificar la trayectoria evolutiva de la deformidad.

En el ámbito de las lesiones musculares y tendinosas asociadas a alteraciones estructurales del pie, los ensayos clínicos recientes han evaluado la eficacia de intervenciones conservadoras como ortesis personalizadas, programas de fortalecimiento intrínseco y entrenamiento propioceptivo. Un metaanálisis que integró estudios controlados aleatorizados concluyó que las ortesis semirrígidas pueden reducir la sobrecarga del tibial posterior y mejorar parámetros cinemáticos en niños con pronación excesiva sintomática, aunque los efectos varían según la severidad inicial y la adherencia al tratamiento (Uden, Scharfbillig & Causby, 2017). Asimismo, programas de ejercicio orientados al fortalecimiento de la musculatura intrínseca plantar han mostrado mejoras significativas en altura del arco medial y en estabilidad dinámica tras intervenciones de doce

semanas, sugiriendo que la plasticidad neuromuscular en la infancia constituye una ventana terapéutica valiosa (Hollander et al., 2019).

La evidencia científica reciente también ha explorado el impacto de las deformidades plantares sobre el gasto energético durante la marcha y la carrera en población pediátrica. Estudios experimentales que utilizaron análisis metabólico indirecto han demostrado que niños con alteraciones estructurales moderadas presentan incremento significativo en consumo de oxígeno durante tareas locomotoras estandarizadas, lo que sugiere menor eficiencia biomecánica global (Mickle et al., 2019). Este aumento del costo energético podría explicar la aparición temprana de fatiga y la disminución en la participación en actividades físicas prolongadas. Desde una perspectiva de salud pública, estos hallazgos subrayan la importancia de abordar las alteraciones estructurales no solo por su impacto local, sino también por su posible influencia en niveles generales de actividad física y bienestar cardiovascular.

En relación con los trastornos posturales asociados, investigaciones clínicas han utilizado métodos de análisis radiográfico y escaneo tridimensional para evaluar cambios en la alineación pélvica y lumbar tras intervenciones dirigidas al soporte plantar. Algunos estudios han reportado mejorías significativas en inclinación pélvica y reducción de compensaciones lumbares en niños con pronación asimétrica tratados con ortesis personalizadas durante periodos de seguimiento superiores a seis meses (Khamis & Yizhar, 2017). Aunque la literatura reconoce que la relación causal directa entre soporte plantar y alineación axial requiere mayor investigación, la evidencia acumulada sugiere una interdependencia biomecánica clínicamente relevante que justifica abordajes integrales.

La investigación genética emergente ha comenzado a explorar la posible contribución de variantes en genes relacionados con la síntesis de colágeno y la estructura ligamentaria en la predisposición a deformidades del pie. Estudios preliminares indican que alteraciones en la composición del tejido conectivo podrían influir en la laxitud ligamentaria y, por ende, en la estabilidad del arco plantar (Powell et al., 2020). Aunque estos hallazgos aún se encuentran en fases exploratorias, abren nuevas líneas de investigación orientadas a comprender la

base biológica de ciertas deformidades persistentes y a desarrollar estrategias preventivas basadas en riesgo individual.

En el campo de la imagenología avanzada, la resonancia magnética ha permitido analizar cambios microestructurales en tendones y aponeurosis plantares en etapas tempranas de sobrecarga mecánica. Investigaciones recientes han identificado signos de edema subclínico en el tendón tibial posterior en niños con pronación sintomática incluso antes de la aparición de dolor manifiesto, lo que sugiere que las adaptaciones patológicas pueden preceder a la sintomatología clínica (Chen et al., 2018). Esta capacidad de detección precoz refuerza la importancia de evaluaciones tempranas y seguimiento periódico en poblaciones de riesgo.

Los estudios comparativos entre poblaciones activas y sedentarias han mostrado que el nivel de actividad física influye en la expresión clínica de las deformidades plantares. Mientras que la actividad moderada parece favorecer el fortalecimiento intrínseco y la estabilidad dinámica, la exposición a cargas repetitivas intensas sin adecuada adaptación puede exacerbar desequilibrios estructurales (Hollander et al., 2019). Esta dualidad evidencia que el movimiento no es inherentemente protector ni perjudicial, sino que su impacto depende de la dosificación, la progresión y la adecuación biomecánica.

La revisión sistemática de literatura publicada en los últimos cinco años coincide en señalar la necesidad de criterios diagnósticos estandarizados para clasificar la severidad de deformidades plantares infantiles. La heterogeneidad metodológica entre estudios —particularmente en la definición de pie plano flexible versus rígido— ha dificultado la comparación de resultados y la formulación de guías clínicas uniformes (Uden et al., 2017). Sin embargo, existe consenso en que la combinación de evaluación clínica estructurada, análisis funcional y seguimiento longitudinal constituye el enfoque más robusto para determinar la relevancia clínica de cada caso.

En conjunto, la evidencia científica y los estudios clínicos recientes consolidan una visión integradora en la que las deformidades del pie infantil, las lesiones musculotendinosas asociadas y los trastornos de la marcha y postura deben analizarse como fenómenos interrelacionados dentro de un sistema biomecánico

y neuromotor en desarrollo. Lejos de adoptar posturas alarmistas o intervencionistas indiscriminadas, la literatura contemporánea aboga por un enfoque basado en evidencia que combine vigilancia clínica, intervención selectiva y promoción del fortalecimiento funcional (Mickle et al., 2019; Hollander et al., 2019). Esta perspectiva permite equilibrar el respeto por la variabilidad fisiológica del desarrollo con la prevención de complicaciones estructurales persistentes, consolidando un paradigma clínico más preciso y científicamente fundamentado.

Los ensayos clínicos controlados aleatorizados publicados en los últimos años han aportado evidencia relevante sobre la efectividad comparativa de diferentes abordajes conservadores en el manejo de deformidades plantares sintomáticas en población pediátrica. Particularmente, estudios que comparan ortesis personalizadas frente a plantillas prefabricadas han evidenciado diferencias significativas en la redistribución de presiones plantares y en la reducción del dolor asociado a sobrecarga medial, aunque los resultados funcionales a largo plazo muestran variabilidad dependiente de la adherencia terapéutica y del grado de maduración esquelética (Uden, Scharfbillig & Causby, 2017). Además, investigaciones que incorporan análisis cinemático tridimensional pre y post intervención han documentado mejoras en la alineación del retropié y reducción de la eversión subtalar excesiva tras programas combinados de ortesis y fortalecimiento intrínseco. Estos hallazgos sugieren que la intervención multimodal puede ofrecer beneficios superiores en comparación con estrategias aisladas, especialmente cuando se implementa durante etapas de alta plasticidad musculoesquelética.

La literatura reciente también ha explorado el impacto de intervenciones basadas en ejercicio terapéutico estructurado sobre la morfología del arco plantar y la estabilidad dinámica en niños con pie plano flexible. Estudios longitudinales con seguimiento superior a doce meses han demostrado que programas progresivos de fortalecimiento del músculo abductor del hallux y de la musculatura intrínseca plantar generan incrementos medibles en la altura del arco medial y mejoras en el control postural durante tareas de apoyo monopodal (Hollander et al., 2019). La utilización de ultrasonografía para evaluar cambios en el grosor muscular ha permitido correlacionar adaptaciones morfológicas con mejoras funcionales,

respaldando la hipótesis de que el arco plantar posee capacidad adaptativa en respuesta a estímulos mecánicos apropiadamente dosificados. No obstante, los autores advierten que la magnitud del efecto depende de la consistencia del programa y del nivel inicial de laxitud ligamentaria.

En relación con el hallux valgus juvenil, estudios observacionales multicéntricos han identificado que la progresión angular de la deformidad durante la adolescencia temprana se asocia con factores biomecánicos como hipermovilidad del primer radio y desequilibrios en la musculatura intrínseca del antepié. Investigaciones recientes han utilizado radiografías digitales seriadas para cuantificar la evolución del ángulo intermetatarsiano y del ángulo metatarsofalángico, demostrando que la progresión es más acelerada en presencia de antecedentes familiares y en casos con pronación excesiva concomitante (Chen et al., 2018). Estos datos han impulsado el desarrollo de protocolos de seguimiento periódico que permiten identificar tempranamente patrones de progresión rápida y considerar intervenciones conservadoras dirigidas a estabilizar el primer radio antes de que la deformidad alcance grados estructuralmente rígidos.

La evidencia procedente de estudios de resonancia magnética funcional ha comenzado a revelar cambios adaptativos en tejidos blandos periarticulares asociados a deformidades plantares persistentes. En particular, se han identificado modificaciones en la señal del tendón tibial posterior y en la aponeurosis plantar en niños con pronación sintomática crónica, incluso en ausencia de dolor clínicamente significativo (Powell et al., 2020). Estos hallazgos sugieren que las alteraciones biomecánicas sostenidas pueden inducir microadaptaciones tisulares subclínicas que preceden a la manifestación sintomática. La capacidad de detectar estas modificaciones tempranas podría representar una herramienta diagnóstica valiosa para implementar intervenciones preventivas antes de la instauración de daño estructural irreversible.

En el ámbito epidemiológico, estudios poblacionales recientes han estimado la prevalencia de pie plano flexible en escolares entre un 14 % y un 25 %, dependiendo de los criterios diagnósticos utilizados y del rango etario evaluado

(Mickle et al., 2019). La heterogeneidad metodológica, particularmente en la definición operacional de arco colapsado, ha generado variabilidad en los resultados, lo que subraya la necesidad de estandarizar instrumentos de medición y puntos de corte clínicamente relevantes. No obstante, existe consenso en que solo una proporción menor de estos casos desarrolla sintomatología persistente, lo que refuerza la importancia de diferenciar entre variabilidad anatómica benigna y deformidad clínicamente significativa que requiera intervención.

Investigaciones recientes han evaluado la relación entre alteraciones plantares y riesgo de lesiones proximales en miembros inferiores durante la práctica deportiva. Estudios prospectivos en jóvenes atletas han demostrado que la presencia de pronación excesiva se asocia con mayor incidencia de síndrome de dolor femoropatelar y tendinopatía rotuliana, posiblemente debido a incremento en la rotación interna tibial y al valgo dinámico de rodilla durante aterrizajes (Chen et al., 2018). Estos hallazgos respaldan la teoría de la cadena cinética ascendente, en la cual una alteración distal puede amplificar cargas en segmentos proximales, incrementando la probabilidad de lesión. La evidencia sugiere que la identificación temprana de patrones biomecánicos alterados podría contribuir a estrategias preventivas en contextos deportivos escolares.

Desde la perspectiva del desarrollo neuromotor, estudios experimentales han analizado la interacción entre soporte plantar y control postural mediante plataformas estabilométricas de alta precisión. Se ha observado que la corrección parcial de la pronación mediante ortesis puede reducir la oscilación anteroposterior y mejorar la simetría en la distribución de cargas durante la bipedestación prolongada (Hollander et al., 2019). Estos cambios sugieren que la modificación de la información aferente plantar puede influir en la organización central del equilibrio, evidenciando la naturaleza integradora del sistema postural. Sin embargo, la magnitud del efecto parece depender de la edad y del grado de adaptación neuromuscular previo.

Los estudios de seguimiento a largo plazo que evalúan resultados funcionales en la adultez joven han comenzado a aportar datos relevantes sobre la evolución natural de las deformidades infantiles. Algunas cohortes seguidas durante más

de diez años muestran que la mayoría de los pies planos flexibles asintomáticos en la infancia evolucionan hacia configuraciones funcionales normales, mientras que aquellos asociados a dolor o limitación funcional presentan mayor probabilidad de persistencia estructural (Uden et al., 2017). Estos hallazgos apoyan un enfoque clínico prudente, basado en la monitorización activa más que en intervenciones indiscriminadas, priorizando la sintomatología y la disfunción sobre criterios exclusivamente morfológicos.

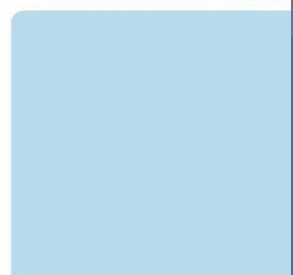
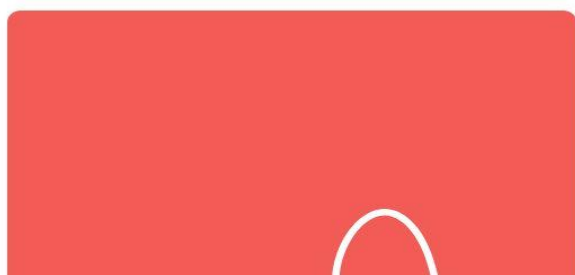
En cuanto a innovación tecnológica, el uso de escaneo tridimensional y modelado digital ha permitido desarrollar plantillas personalizadas con mayor precisión geométrica, optimizando la distribución de presiones plantares y reduciendo puntos de sobrecarga focal (Powell et al., 2020). La integración de inteligencia artificial en el análisis de patrones de marcha promete mejorar la capacidad predictiva para identificar niños con mayor riesgo de progresión estructural. Estas herramientas emergentes, aunque aún en fase de validación clínica amplia, representan un avance significativo hacia una ortopedia pediátrica más personalizada y basada en datos objetivos.

En síntesis, la evidencia científica reciente converge en señalar que las deformidades ortopédicas del pie infantil, las lesiones musculotendinosas asociadas y los trastornos de la marcha deben abordarse mediante un paradigma integrador sustentado en investigación longitudinal, tecnología diagnóstica avanzada y estrategias terapéuticas individualizadas. Lejos de considerar estas condiciones como meras variaciones anatómicas sin relevancia clínica, la literatura contemporánea destaca su potencial impacto funcional cuando se combinan factores predisponentes y cargas biomecánicas repetitivas (Mickle et al., 2019; Hollander et al., 2019). El desafío actual radica en perfeccionar criterios de estratificación de riesgo, fortalecer la calidad metodológica de los ensayos clínicos y consolidar guías basadas en evidencia que orienten la toma de decisiones en la práctica ortopédica pediátrica.



CAPITULO V

BENEFICIOS DE LA ESTIMULACIÓN NATURAL DEL PIE



Juego descalzo y desarrollo sensorial

El juego descalzo constituye una experiencia neurosensorial integral que favorece la maduración progresiva del sistema somatosensorial durante la infancia, particularmente en etapas críticas del desarrollo cortical en las que la plasticidad neuronal es máxima. La superficie plantar del pie humano contiene una elevada densidad de mecanorreceptores cutáneos —incluyendo corpúsculos de Meissner, discos de Merkel, corpúsculos de Pacini y terminaciones de Ruffini— especializados en la detección de presión, vibración, estiramiento cutáneo y cambios dinámicos del soporte. La estimulación directa de estos receptores mediante el contacto con superficies naturales genera patrones aferentes ricos y variados que viajan a través de vías espinotalámicas y lemniscales hacia la corteza somatosensorial primaria, promoviendo la organización sináptica y el refinamiento perceptivo (Kandel et al., 2013). La ausencia de barreras rígidas entre el pie y el entorno permite una estimulación más precisa y menos atenuada que la generada por calzado estructurado.

Desde la perspectiva de la neuroplasticidad del desarrollo, la experiencia sensorial repetida y diversificada constituye un modulador esencial de la arquitectura cortical en la infancia. El juego descalzo, al exponer de manera continua la superficie plantar a variaciones de textura, firmeza, temperatura y microirregularidades del terreno, estimula patrones aferentes complejos que fortalecen la sinaptogénesis dependiente de actividad en la corteza somatosensorial primaria y secundaria. Durante los períodos críticos del desarrollo, la potenciación a largo plazo y los procesos de poda sináptica selectiva refinan los mapas corticales según la calidad y frecuencia de los estímulos recibidos (Kandel et al., 2013). En este contexto, la reducción sistemática de estímulos plantares —como puede ocurrir con el uso constante de calzado rígido y altamente amortiguado— podría limitar la riqueza aferente necesaria para la consolidación óptima de circuitos sensoriales, mientras que la interacción directa con el entorno natural favorece la organización funcional eficiente de las representaciones corporales.

La integración multisensorial que se deriva del contacto plantar directo con el suelo constituye un componente esencial de la regulación postural y del control

motor anticipatorio. La información táctil proveniente de los mecanorreceptores cutáneos se combina con señales propioceptivas musculotendinosas y aferencias vestibulares, convergiendo en estructuras como el cerebelo, el tálamo y las áreas parietales posteriores, donde se integran para generar ajustes posturales automáticos (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Cuando el niño camina o corre descalzo sobre superficies variables, la detección inmediata de cambios en la inclinación o consistencia del terreno desencadena respuestas musculares reflejas que optimizan la estabilidad dinámica. Este proceso no solo mejora la precisión motora, sino que fortalece los circuitos de retroalimentación sensoriomotora responsables de la adaptación rápida a entornos cambiantes.

Desde un enfoque evolutivo y antropológico, el pie humano se configuró como una estructura sensorial-motora capaz de interactuar directamente con entornos heterogéneos, mucho antes de la generalización cultural del calzado estructurado. La literatura en biomecánica evolutiva sugiere que la locomoción descalza promueve patrones de apoyo más eficientes y una activación muscular intrínseca más pronunciada, lo que podría relacionarse con una mayor sensibilidad plantar (Lieberman, 2012). En la infancia, etapa caracterizada por alta plasticidad neural y adaptabilidad tisular, la interacción directa con el suelo puede considerarse coherente con los principios biológicos de desarrollo funcional. La estimulación natural favorece un aprendizaje motor contextualizado que respeta la organización anatómica y fisiológica del pie en crecimiento.

La activación de receptores cutáneos plantares desempeña un papel determinante en la modulación del tono muscular axial y apendicular. La información aferente influye sobre circuitos espinales y suprasegmentarios que regulan la actividad de músculos estabilizadores profundos, contribuyendo a la coordinación entre segmentos corporales durante la locomoción (Proske & Gandevia, 2012). En el niño, cuya organización postural aún se encuentra en consolidación, la retroalimentación plantar directa facilita la sincronización entre cadenas musculares anteriores y posteriores, promoviendo un equilibrio funcional entre estabilidad y movilidad. Esta interacción dinámica fortalece la construcción progresiva de patrones motores más eficientes y adaptativos.

La variabilidad ambiental constituye un factor clave en el aprendizaje sensoriomotor. Caminar descalzo sobre arena blanda exige ajustes diferentes a los requeridos en superficies rígidas o irregulares; cada contexto genera configuraciones específicas de activación sensorial y muscular. Esta diversidad de experiencias amplía el repertorio motor del niño y fortalece la capacidad de adaptación contextual, un componente esencial del desarrollo motor típico (Adolph & Hoch, 2019). La exposición repetida a entornos variados facilita la calibración entre percepción y acción, permitiendo respuestas más precisas frente a desafíos motores futuros.

La teoría ecológica del desarrollo motor sostiene que la percepción está intrínsecamente vinculada a la acción y que ambas emergen en interacción con el entorno. El juego descalzo potencia este acoplamiento percepción-acción al permitir que el niño experimente directamente las propiedades físicas del suelo —dureza, fricción, elasticidad— y ajuste su comportamiento en consecuencia (Gibson, 1979). Este proceso fortalece la sensibilidad a las “afordancias” del entorno, es decir, a las oportunidades de acción que ofrece cada superficie, favoreciendo decisiones motoras más eficientes y seguras.

La representación cortical del pie en el homúnculo sensorial ocupa una proporción significativa en la corteza somatosensorial. La estimulación directa y rica en variabilidad puede incrementar la precisión de dicha representación mediante mecanismos de reorganización cortical dependientes de experiencia (Kandel et al., 2013). En la infancia, esta reorganización tiene implicaciones duraderas, ya que influye en la exactitud con que el sistema nervioso interpreta señales provenientes del miembro inferior, afectando la calidad global del movimiento.

El uso prolongado de calzado altamente estructurado puede atenuar la intensidad y diversidad de la información sensorial plantar, reduciendo la estimulación necesaria para el refinamiento perceptivo. Si bien el calzado cumple funciones protectoras indispensables en determinados contextos, su utilización constante en ambientes seguros podría limitar oportunidades de exploración sensorial esenciales para el desarrollo neuromotor (Rao & Joseph, 1992). El

equilibrio entre protección y estimulación resulta, por tanto, un aspecto relevante en la promoción del desarrollo saludable.

La discriminación térmica y vibratoria constituye otro componente del desarrollo sensorial plantar. La exposición a variaciones de temperatura y microvibraciones del terreno activa receptores especializados que enriquecen la experiencia somática y fortalecen la integración multisensorial (Bear et al., 2020). Esta estimulación contribuye a la capacidad del niño para interpretar condiciones ambientales y ajustar su comportamiento motor de forma adaptativa.

El aprendizaje implícito derivado del juego descalzo se sustenta en procesos de retroalimentación inmediata. Cada paso genera información que es evaluada inconscientemente por el sistema nervioso central, produciendo ajustes automáticos que optimizan la eficiencia del movimiento. Estos mecanismos dependen de circuitos subcorticales, especialmente cerebelosos, que consolidan patrones motores estables mediante repetición contextualizada (Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

El enriquecimiento sensorial temprano se asocia con mayor densidad dendrítica y fortalecimiento sináptico, procesos que respaldan la adquisición de habilidades motoras complejas (Kolb & Gibb, 2011). Aunque la mayoría de la evidencia proviene de estudios experimentales, los principios de plasticidad neural sugieren que la diversidad sensorial favorece una organización cortical más robusta y flexible.

Cada contacto plantar proporciona información detallada sobre distribución de cargas y estabilidad mecánica. Esta retroalimentación es esencial para ajustar la activación muscular durante la fase de apoyo de la marcha, evitando patrones compensatorios ineficientes (Proske & Gandevia, 2012).

Durante la maduración de la marcha infantil, el contacto directo con el suelo facilita la transición desde patrones amplios e inestables hacia secuencias locomotoras más refinadas. La experiencia repetida fortalece programas motores centrales responsables de la coordinación intersegmentaria (Adolph & Hoch, 2019).

La detección de microoscilaciones corporales a través de la presión plantar permite correcciones anticipatorias que mejoran el equilibrio estático y dinámico. Este mecanismo depende de la rapidez con que la información sensorial es procesada e integrada (Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

Desde el punto de vista biomecánico, la percepción plantar contribuye a una distribución de presiones más equilibrada entre retropié, mediopié y antepié, favoreciendo patrones de apoyo fisiológicos (Lieberman, 2012).

La exposición gradual a diferentes estímulos táctiles puede favorecer procesos de habituación en niños con hipersensibilidad leve, promoviendo tolerancia sensorial progresiva mediante mecanismos adaptativos centrales (Bear et al., 2020).

En contextos educativos y terapéuticos, la inclusión de períodos supervisados de actividad descalza puede enriquecer el entorno sensorial del niño, contribuyendo a la maduración neuromotora integral (Adolph & Hoch, 2019).

La confianza en la información proveniente de los propios pies fortalece la autorregulación postural y la autonomía motriz, consolidando patrones de movimiento más seguros y eficientes.

En conjunto, la evidencia neurocientífica y biomecánica respalda que el juego descalzo, cuando se realiza en entornos seguros, constituye un estímulo fisiológicamente congruente con los principios de plasticidad neural, integración multisensorial y desarrollo motor progresivo, favoreciendo una organización sensoriomotora sólida y adaptativa (Kandel et al., 2013; Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

Fortalecimiento de músculos y ligamentos

El fortalecimiento de la musculatura intrínseca y extrínseca del pie durante la infancia constituye un componente esencial en la consolidación de una arquitectura funcional estable y adaptable. La actividad descalza favorece una activación más intensa de los músculos intrínsecos —como el flexor corto de los dedos, el abductor del hallux y los interóseos plantares— cuya función principal es sostener el arco longitudinal medial y estabilizar el antepié durante la fase de apoyo. A diferencia del uso constante de calzado estructurado, que puede asumir

parte de la función estabilizadora mediante elementos rígidos o amortiguados, la marcha descalza exige que estos músculos participen activamente en el control de la bóveda plantar. Esta activación repetida estimula procesos de hipertrofia funcional y mejora la resistencia muscular, contribuyendo a una estructura más competente desde el punto de vista biomecánico (Lieberman, 2012).

La musculatura extrínseca del pie y tobillo —incluyendo tibial posterior, peroneos, gastrocnemio y sóleo— desempeña un papel determinante en la estabilización dinámica durante la locomoción. Cuando el niño camina o corre descalzo, la ausencia de soporte externo obliga a estos músculos a modular activamente la pronación y supinación del pie en respuesta a las irregularidades del terreno. Esta activación constante mejora la coordinación neuromuscular y fortalece las cadenas cinéticas que conectan el pie con la rodilla y la cadera, promoviendo una alineación funcional más eficiente (Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

Desde el punto de vista fisiológico, el fortalecimiento muscular se produce a través de adaptaciones estructurales como el aumento del área transversal de las fibras y mejoras en la sincronización de unidades motoras. La estimulación repetida generada por el contacto directo con el suelo incrementa la demanda propioceptiva y contráctil, favoreciendo procesos adaptativos progresivos. En el contexto del desarrollo infantil, estas adaptaciones se integran con la maduración neurológica, generando patrones motores más sólidos y eficientes (Kandel et al., 2013).

El fortalecimiento ligamentoso también constituye un elemento clave en la estabilidad del pie en crecimiento. Los ligamentos plantares, incluyendo el ligamento calcaneonavicular plantar (ligamento en resorte), participan en el mantenimiento del arco medial. La carga fisiológica intermitente derivada de la actividad descalza estimula procesos de remodelación tisular mediante mecanotransducción, mecanismo por el cual las fuerzas mecánicas influyen en la síntesis y organización de colágeno (Proske & Gandevia, 2012). Esta adaptación contribuye a una mayor resistencia estructural.

La interacción entre músculos y ligamentos es fundamental para el comportamiento viscoelástico del pie. Cuando el niño se desplaza descalzo

sobre superficies variables, los tejidos blandos deben absorber y redistribuir fuerzas de impacto sin asistencia artificial significativa. Este proceso fortalece la capacidad elástica del sistema musculoligamentoso, mejorando su eficiencia mecánica y reduciendo la dependencia de soportes externos (Lieberman, 2012).

Durante la infancia, los tejidos conectivos presentan mayor plasticidad debido a una mayor proporción de matriz extracelular en remodelación. La exposición a cargas fisiológicas adecuadas estimula la alineación de fibras de colágeno según las líneas de tensión predominantes, fortaleciendo la integridad estructural del pie (Kolb & Gibb, 2011). La actividad descalza proporciona un estímulo natural y progresivo para esta reorganización tisular.

El fortalecimiento muscular intrínseco contribuye directamente a la formación y mantenimiento del arco plantar longitudinal medial. Este arco no es una estructura rígida, sino dinámica, cuya estabilidad depende de la acción coordinada de músculos y ligamentos. La activación repetida durante el juego descalzo promueve una adaptación funcional que favorece la elevación y elasticidad del arco (Rao & Joseph, 1992).

Desde la perspectiva de la cinemática de la marcha, la ausencia de calzado rígido permite una mayor movilidad metatarsofalángica durante la fase de despegue. Este rango de movimiento adicional incrementa la activación del flexor largo del hallux y otros músculos implicados en la propulsión, fortaleciendo la fase final del ciclo de la marcha (Lieberman, 2012).

La estabilidad del tobillo depende en gran medida de la fuerza y coordinación de los músculos peroneos y tibiales. La actividad descalza sobre superficies irregulares estimula respuestas reflejas rápidas que mejoran la capacidad estabilizadora y reducen la laxitud funcional (Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

La mecanotransducción inducida por la carga intermitente durante la actividad descalza representa un proceso biológico fundamental para el fortalecimiento de ligamentos y tendones en el pie en desarrollo. Cuando el niño camina, corre o salta sin soporte estructural externo significativo, las fuerzas de tracción y compresión generadas sobre los tejidos conectivos activan mecanorreceptores

celulares que desencadenan cascadas bioquímicas responsables de la síntesis y reorganización de colágeno tipo I. Este fenómeno, ampliamente documentado en fisiología musculoesquelética, favorece el incremento progresivo de la resistencia tensil y la mejora de la capacidad elástica del tejido ligamentoso (Proske & Gandevia, 2012).

En etapas de crecimiento, donde la remodelación tisular es particularmente activa, la exposición a cargas fisiológicas adecuadas contribuye a una organización estructural más alineada con las líneas de fuerza predominantes, fortaleciendo la integridad del complejo articular del mediopié y retropié.

El fortalecimiento progresivo de la musculatura plantar intrínseca desempeña un papel determinante en la distribución homogénea de presiones durante la bipedestación y la locomoción. Cuando estos músculos —especialmente los interóseos y el abductor del hallux— se activan de manera constante, colaboran en la estabilización de las articulaciones metatarsofalángicas y en el mantenimiento dinámico del arco longitudinal medial. Esta acción reduce la concentración excesiva de cargas en puntos específicos como el calcáneo o las cabezas metatarsianas, disminuyendo el riesgo de sobrecargas estructurales. La repetición de estímulos contráctiles bajo condiciones naturales optimiza la resistencia muscular local y favorece la eficiencia biomecánica global del pie (Lieberman, 2012).

La actividad descalza también influye en la coordinación neuromuscular fina entre músculos estabilizadores profundos y musculatura global del miembro inferior. En ausencia de soporte rígido, el sistema nervioso central debe reclutar con mayor precisión unidades motoras específicas para responder a cambios súbitos en el terreno. Esta demanda incrementa la sincronización intermuscular y mejora la calidad del reclutamiento motor, proceso asociado con mayor eficiencia funcional y menor gasto energético durante la marcha (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). En el contexto del crecimiento infantil, dicha optimización contribuye a consolidar patrones motores más estables y resistentes a perturbaciones externas.

El control de la pronación dinámica depende en gran medida de la fuerza y resistencia del tibial posterior, músculo clave en la estabilización del arco medial.

La locomoción descalza exige una activación más consistente de esta estructura para contrarrestar fuerzas de eversión generadas por superficies irregulares. Este estímulo repetido promueve adaptaciones estructurales y funcionales que fortalecen el soporte medial del pie, contribuyendo a prevenir colapsos excesivos durante la fase de apoyo (Rao & Joseph, 1992). Así, el fortalecimiento inducido por la actividad natural puede desempeñar un rol protector frente a alteraciones estructurales futuras.

La adaptación ligamentosa durante la infancia responde a principios de carga progresiva y especificidad mecánica. Los ligamentos plantares, sometidos a tensiones fisiológicas intermitentes en contextos de juego descalzo, reorganizan sus fibras de colágeno para resistir mejor las fuerzas aplicadas. Este proceso de alineación estructural mejora la estabilidad pasiva del pie sin comprometer su elasticidad funcional. La evidencia en fisiología del tejido conectivo sugiere que la ausencia prolongada de carga adecuada puede disminuir la resistencia estructural, mientras que la carga controlada favorece la robustez ligamentosa (Proske & Gandevia, 2012).

El juego descalzo puede considerarse una forma de fortalecimiento funcional integrado, dado que involucra simultáneamente múltiples grupos musculares en patrones de activación coordinados. A diferencia del ejercicio analítico aislado, la locomoción natural activa sinérgicamente músculos intrínsecos, extrínsecos y estabilizadores proximales, generando adaptaciones sistémicas. Este enfoque integrado resulta particularmente beneficioso en la infancia, etapa en la que el aprendizaje motor se construye a partir de experiencias globales más que de tareas segmentadas (Adolph & Hoch, 2019).

La mejora en la rigidez funcional del arco plantar constituye otro efecto relevante del fortalecimiento inducido por actividad descalza. La rigidez adecuada no implica inmovilidad, sino capacidad para almacenar y liberar energía elástica durante la fase de apoyo y propulsión. Cuando la musculatura intrínseca participa activamente, el arco actúa como un resorte biomecánico eficiente, optimizando la transferencia de fuerzas entre retropié y antepié (Lieberman, 2012). Este comportamiento elástico reduce el estrés mecánico acumulativo en estructuras pasivas.

El fortalecimiento coordinado de peroneos y tibiales mejora la estabilidad lateral del tobillo, disminuyendo la susceptibilidad a microinestabilidades funcionales. La exposición a superficies variables durante el juego descalzo genera ajustes reflejos rápidos que incrementan la capacidad reactiva del complejo articular. Este entrenamiento neuromuscular involuntario fortalece la articulación sin necesidad de intervenciones externas específicas (Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

La exposición progresiva a cargas naturales también favorece una adaptación equilibrada entre rigidez y flexibilidad tisular. Un sistema musculoligamentoso excesivamente laxo puede comprometer la estabilidad, mientras que uno excesivamente rígido limita la absorción de impactos. El juego descalzo, al proporcionar estímulos variados y dinámicos, promueve una adaptación intermedia óptima que respeta los principios de homeostasis mecánica (Kandel et al., 2013).

Durante el crecimiento, el incremento gradual del peso corporal exige que las estructuras del pie se adapten proporcionalmente. La actividad descalza facilita esta adaptación progresiva al exponer los tejidos a cargas fisiológicas acordes con la etapa evolutiva, evitando tanto la subestimulación como la sobrecarga abrupta. Este equilibrio favorece un desarrollo estructural armónico y resiliente (Kolb & Gibb, 2011).

En síntesis, la evidencia neurofisiológica, biomecánica y del tejido conectivo converge en señalar que la actividad descalza, realizada en entornos seguros y de forma progresiva, estimula procesos de fortalecimiento muscular y ligamentoso coherentes con los principios de adaptación tisular y plasticidad neuromotora. Este fortalecimiento no solo mejora la estabilidad estructural inmediata, sino que establece una base sólida para la locomoción eficiente y la prevención de disfunciones mecánicas a largo plazo (Lieberman, 2012; Proske & Gandevia, 2012; Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

Mejora del equilibrio y la coordinación

El equilibrio postural en la infancia constituye un proceso dinámico que depende de la integración precisa entre sistemas sensoriales, control neuromuscular y organización biomecánica segmentaria. La actividad descalza incrementa de manera significativa la calidad y cantidad de información aferente proveniente de los mecanorreceptores plantares, lo que optimiza la detección de oscilaciones mínimas del centro de presión durante la bipedestación y la marcha. Esta retroalimentación sensorial inmediata permite ajustes posturales anticipatorios y compensatorios más eficaces, mediadas por circuitos espinales y cerebelosos que regulan la activación de musculatura estabilizadora profunda (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). En el contexto del desarrollo infantil, donde los sistemas de control postural aún están en consolidación, la estimulación plantar directa fortalece la calibración entre percepción y acción, favoreciendo un equilibrio más estable y adaptable frente a perturbaciones externas.

La coordinación motora implica la sincronización temporal y espacial de múltiples grupos musculares para ejecutar movimientos eficientes. El juego descalzo sobre superficies variables exige ajustes constantes en la longitud del paso, la base de sustentación y el patrón de activación muscular, lo que incrementa la demanda coordinativa. Esta variabilidad promueve una mayor integración intersegmentaria entre pie, tobillo, rodilla y cadera, fortaleciendo las cadenas cinéticas ascendentes responsables del control global del movimiento (Adolph & Hoch, 2019). La repetición contextualizada de estas adaptaciones mejora la precisión motora y reduce la variabilidad excesiva no funcional.

Desde el punto de vista neurofisiológico, el equilibrio depende de la convergencia de información visual, vestibular y somatosensorial en núcleos cerebelosos y estructuras corticales parietales. La privación parcial de información plantar, como puede ocurrir con calzado altamente amortiguado, reduce la calidad del componente somatosensorial en esta integración. En contraste, la actividad descalza potencia la señal táctil y propioceptiva, facilitando un procesamiento multisensorial más robusto y preciso (Kandel et al., 2013). Este enriquecimiento sensorial mejora la capacidad del sistema nervioso central para generar respuestas posturales automáticas ante cambios inesperados del entorno.

La mejora del equilibrio dinámico durante la locomoción descalza se relaciona con la activación más eficiente de músculos estabilizadores del tobillo, particularmente peroneos y tibiales. Estos músculos responden rápidamente a microinclinaciones del retropié detectadas por receptores cutáneos y articulares, evitando desplazamientos excesivos del centro de gravedad. El entrenamiento involuntario derivado de esta estimulación repetida incrementa la capacidad reactiva del sistema neuromuscular, reduciendo el tiempo de latencia ante perturbaciones (Proske & Gandevia, 2012).

El desarrollo del control postural anticipatorio se ve favorecido por la experiencia repetida de desafíos motores en entornos variables. Cuando el niño se desplaza descalzo sobre superficies irregulares, aprende a anticipar cambios en la estabilidad antes de que ocurran, ajustando la activación muscular de manera predictiva. Este mecanismo depende de circuitos cerebelosos responsables de la temporización y coordinación fina del movimiento (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). La consolidación de estas respuestas anticipatorias fortalece la seguridad motriz.

La coordinación interhemisférica también puede beneficiarse de la actividad descalza, ya que la alternancia rítmica de apoyos estimula patrones bilaterales simétricos en la corteza motora. La información aferente diferenciada de cada pie contribuye a la precisión temporal del patrón locomotor, facilitando la organización de redes neuronales responsables del ritmo y la secuencia motora (Kandel et al., 2013). Esta sincronización resulta esencial para habilidades más complejas como el salto y la carrera.

La estabilidad en apoyo monopodal constituye un indicador clave de equilibrio funcional. La actividad descalza incrementa la sensibilidad a microdesplazamientos laterales y anteroposteriores, mejorando la capacidad de mantener la alineación corporal sobre una base reducida de sustentación. Este entrenamiento natural fortalece la musculatura estabilizadora profunda del tobillo y mejora la integración sensoriomotora (Adolph & Hoch, 2019).

Desde una perspectiva biomecánica, la ausencia de soporte rígido obliga al sistema musculoesquelético a distribuir activamente las fuerzas de reacción del suelo. Este proceso mejora la capacidad de absorción de impactos y reduce la

dependencia de mecanismos pasivos externos. La coordinación resultante favorece una marcha más eficiente y armónica (Lieberman, 2012).

El cerebelo desempeña un papel central en la adaptación motora basada en error. Cada irregularidad del terreno genera pequeñas discrepancias entre el movimiento esperado y el ejecutado; estas diferencias son procesadas para ajustar patrones futuros. La actividad descalza incrementa la frecuencia de estas oportunidades de aprendizaje adaptativo, refinando la coordinación global (Kandel et al., 2013).

La mejora del equilibrio también se relaciona con la optimización del control del centro de masa corporal. La información plantar directa permite detectar variaciones en la distribución de presión, facilitando ajustes rápidos en la activación muscular axial y apendicular. Este control refinado disminuye oscilaciones excesivas y fortalece la estabilidad funcional (Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

La coordinación ojo-pie se fortalece significativamente cuando el niño interactúa descalzo con entornos variables que exigen evaluación visual constante del terreno. La necesidad de anticipar irregularidades, cambios de textura o desniveles obliga al sistema nervioso a integrar información visual con retroalimentación somatosensorial plantar en tiempo real. Esta integración visomotora se procesa en circuitos parietales y cerebelosos responsables de ajustar la trayectoria del movimiento antes del contacto con el suelo (Kandel et al., 2013). La activación simultánea de estos sistemas mejora la precisión temporal del apoyo, optimiza la colocación del pie y reduce errores motores derivados de desajustes perceptivos. En el contexto del desarrollo infantil, esta práctica repetida fortalece redes neuronales responsables de la sincronización perceptivo-motora, estableciendo bases sólidas para habilidades deportivas y locomotoras más complejas en etapas posteriores.

La repetición de desafíos posturales en condiciones de variabilidad sensorial incrementa la resistencia del sistema neuromuscular frente a la fatiga, un componente fundamental del equilibrio funcional sostenido. Cuando el niño juega descalzo durante periodos prolongados, los músculos estabilizadores profundos del tobillo y del tronco deben mantener ajustes continuos ante

microperturbaciones. Esta activación persistente mejora la eficiencia metabólica muscular y fortalece la capacidad de sostener contracciones submáximas sin pérdida de precisión (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). En consecuencia, la estabilidad postural no depende únicamente de fuerza máxima, sino de la resistencia coordinativa que permite mantener alineación segmentaria incluso bajo demandas prolongadas.

La activación sincronizada de musculatura proximal y distal constituye un elemento esencial en la coordinación global del movimiento. Durante la actividad descalza, los ajustes iniciados en el pie se transmiten a través de la cadena cinética hacia rodilla, cadera y musculatura paravertebral, generando respuestas integradas que mantienen el centro de masa dentro de la base de sustentación. Esta interacción dinámica fortalece la comunicación neuromuscular intersegmentaria y mejora la estabilidad global (Adolph & Hoch, 2019). La experiencia repetida consolida patrones motores armónicos, reduciendo compensaciones innecesarias que podrían comprometer la eficiencia biomecánica.

La adaptabilidad motora se ve particularmente beneficiada por la exposición a superficies impredecibles. La locomoción descalza sobre terrenos irregulares obliga al sistema nervioso a actualizar constantemente sus predicciones motoras basadas en la experiencia previa. Este proceso de ajuste continuo, mediado por el cerebelo y la corteza motora, optimiza la precisión de respuestas futuras ante contextos similares (Kandel et al., 2013). En la infancia, etapa caracterizada por alta plasticidad neuronal, la repetición de estas experiencias fortalece circuitos responsables del aprendizaje adaptativo, mejorando la capacidad de responder eficazmente a entornos cambiantes.

La reducción del tiempo de latencia en respuestas reflejas constituye otro beneficio relevante del juego descalzo. Los mecanorreceptores plantares detectan cambios súbitos en la inclinación o firmeza del suelo y transmiten señales rápidamente a través de vías aferentes hacia centros espinales y suprasegmentarios. La práctica repetida mejora la velocidad de procesamiento y la eficacia de las respuestas motoras correctivas, disminuyendo el riesgo de pérdida de equilibrio ante perturbaciones inesperadas (Proske & Gandevia,

2012). Este entrenamiento reflejo natural fortalece la seguridad locomotora en actividades cotidianas y deportivas.

La coordinación rítmica de la marcha depende de generadores centrales de patrones ubicados en la médula espinal, modulados por aferencias sensoriales periféricas. La retroalimentación táctil continua que proporciona el contacto plantar directo contribuye a afinar la temporización de estos patrones, mejorando la regularidad y fluidez del ciclo locomotor (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Esta precisión rítmica resulta fundamental para la transición hacia habilidades más complejas como la carrera, el salto o cambios rápidos de dirección.

La estabilidad lateral del tobillo mejora mediante la activación repetida de músculos peroneos en respuesta a microdesplazamientos detectados por receptores cutáneos y articulares. La actividad descalza sobre superficies con variabilidad lateral estimula ajustes rápidos que fortalecen la capacidad de controlar movimientos de inversión y eversión excesivos. Este proceso incrementa la estabilidad funcional y mejora la confianza motriz del niño al desplazarse en entornos abiertos (Lieberman, 2012). La repetición de estas respuestas consolida adaptaciones neuromusculares protectoras.

La integración multisensorial robusta derivada del juego descalzo fortalece la coordinación global al permitir que el sistema nervioso procese información convergente con mayor precisión. La interacción simultánea entre señales visuales, vestibulares y plantares optimiza la percepción espacial y mejora la orientación corporal en el entorno (Kandel et al., 2013). Esta capacidad integradora resulta esencial para el aprendizaje de habilidades deportivas que exigen cambios rápidos de dirección y control postural dinámico.

El equilibrio dinámico consolidado durante la infancia actúa como fundamento para la adquisición progresiva de destrezas motoras avanzadas en la adolescencia. La experiencia temprana de control postural refinado facilita la transición hacia movimientos de mayor complejidad biomecánica, como desplazamientos multidireccionales o actividades que requieren alta precisión coordinativa (Adolph & Hoch, 2019). De esta manera, la práctica descalza contribuye indirectamente al desarrollo de competencia motriz global.

En síntesis, la actividad descalza realizada en contextos seguros y con progresión adecuada fortalece de manera integral los mecanismos neurales responsables del equilibrio y la coordinación. A través de la estimulación sensorial directa, la activación muscular adaptativa y la integración multisensorial eficiente, el sistema neuromotor infantil desarrolla respuestas más rápidas, precisas y estables frente a desafíos posturales. Esta consolidación temprana de la competencia coordinativa establece una base neurobiomecánica sólida que favorece la eficiencia locomotora y la seguridad motriz a lo largo del crecimiento (Kandel et al., 2013; Shumway-Cook & Woollacott, 2017; Proske & Gandevia, 2012).

Prevención de lesiones futuras

La prevención de lesiones musculoesqueléticas en la infancia no debe entenderse únicamente como la evitación inmediata de traumatismos agudos, sino como la construcción progresiva de una base estructural y neuromotora resiliente capaz de tolerar cargas crecientes a lo largo del crecimiento. La actividad descalza, cuando se realiza en entornos seguros y de forma gradual, puede contribuir a este objetivo al fortalecer los mecanismos de absorción de impacto, optimizar la alineación biomecánica y mejorar la integración sensoriomotora. La evidencia en control motor indica que un sistema con retroalimentación sensorial rica y respuestas neuromusculares eficientes reduce la probabilidad de errores mecánicos acumulativos que, con el tiempo, pueden derivar en lesiones por sobreuso (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). En este sentido, la estimulación plantar directa no solo tiene implicaciones en el presente funcional del niño, sino también en su perfil de riesgo futuro.

Las lesiones por sobrecarga suelen originarse en desequilibrios biomecánicos persistentes que generan distribución inadecuada de fuerzas en tejidos específicos. El fortalecimiento de la musculatura intrínseca y extrínseca del pie mediante actividad descalza favorece una distribución más homogénea de presiones durante la marcha y la carrera, disminuyendo picos de estrés focalizados en estructuras vulnerables como el calcáneo, las cabezas metatarsianas o el tendón de Aquiles (Lieberman, 2012). Al optimizar la función amortiguadora activa del pie, se reduce la dependencia de mecanismos pasivos

que, cuando son sobrecargados repetidamente, pueden degenerar en procesos inflamatorios o microlesiones.

La estabilidad dinámica del tobillo representa un factor determinante en la prevención de esguinces recurrentes. La actividad descalza en superficies ligeramente irregulares estimula respuestas reflejas rápidas de músculos peroneos y tibiales, fortaleciendo la capacidad reactiva ante movimientos bruscos de inversión o eversión. Esta mejora en la latencia y precisión de la respuesta neuromuscular se asocia con menor incidencia de inestabilidad funcional (Proske & Gandevia, 2012). El entrenamiento natural derivado del juego libre puede, por tanto, actuar como un mecanismo preventivo frente a lesiones ligamentarias futuras.

Desde una perspectiva de desarrollo estructural, la exposición progresiva a cargas fisiológicas favorece la adaptación del tejido conectivo mediante procesos de mecanotransducción que incrementan la resistencia tensil ligamentosa. La adecuada alineación de fibras de colágeno según líneas de tensión predominantes mejora la integridad estructural del arco plantar y del complejo del mediopié (Kandel et al., 2013). Esta reorganización adaptativa reduce la susceptibilidad a colapsos estructurales asociados con sobrecarga repetitiva.

La prevención de lesiones en rodilla y cadera también puede vincularse indirectamente con la función adecuada del pie. El control eficiente de la pronación mediante fortalecimiento del tibial posterior y musculatura intrínseca limita la rotación interna excesiva de la tibia, reduciendo tensiones transmitidas proximalmente a la articulación femorotibial. Una base distal estable contribuye a una alineación global más eficiente, disminuyendo fuerzas anómalas que podrían predisponer a síndromes de sobreuso (Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

El aprendizaje motor adaptativo basado en la experiencia descalza fortalece la capacidad del sistema nervioso para anticipar perturbaciones y ajustar patrones de movimiento antes de que se produzca un fallo mecánico. Esta capacidad predictiva, mediada por circuitos cerebelosos, reduce la probabilidad de tropiezos y caídas, factores frecuentes en lesiones agudas durante la infancia

(Adolph & Hoch, 2019). La prevención, en este contexto, emerge de la optimización del control anticipatorio.

La mejora en la absorción activa de impactos durante la fase de apoyo disminuye la transmisión excesiva de fuerzas hacia estructuras óseas en crecimiento. Cuando la musculatura plantar y del tobillo participa activamente en la amortiguación, se reduce la carga directa sobre cartílagos de crecimiento, contribuyendo a un entorno mecánico más equilibrado durante etapas de rápido desarrollo somático (Lieberman, 2012).

La consolidación de patrones de marcha más naturales puede reducir compensaciones innecesarias que, mantenidas en el tiempo, generan microtraumatismos repetitivos. La experiencia descalza facilita ajustes dinámicos inmediatos ante irregularidades, evitando la repetición de patrones rígidos que podrían sobrecargar estructuras específicas (Kandel et al., 2013).

La mejora del equilibrio dinámico constituye un factor determinante en la reducción de caídas accidentales durante la infancia, uno de los mecanismos más frecuentes de lesión aguda en etapas tempranas del desarrollo. Cuando el niño participa en actividades descalzas en entornos seguros, la información sensorial plantar incrementa la precisión en la detección de desplazamientos del centro de masa y variaciones mínimas en la base de sustentación. Esta retroalimentación inmediata activa respuestas posturales automáticas mediadas por circuitos espinales y cerebelosos, optimizando la coordinación entre musculatura distal y proximal (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). La repetición de estos ajustes fortalece la estabilidad funcional y disminuye la probabilidad de pérdida de equilibrio ante perturbaciones inesperadas, consolidando patrones protectores que pueden persistir en etapas posteriores del crecimiento.

La adaptación progresiva del tendón de Aquiles a cargas fisiológicas intermitentes constituye un elemento relevante en la prevención de tendinopatías futuras. Durante la actividad descalza, la fase de apoyo y despegue exige una participación activa del complejo gastrocnemio-sóleo, incrementando la tensión cíclica sobre el tendón. Este estímulo mecánico controlado activa procesos de mecanotransducción que favorecen la síntesis y reorganización de colágeno, mejorando la capacidad elástica y la resistencia tensil del tejido (Proske &

Gandevia, 2012). En la infancia, etapa caracterizada por alta plasticidad tisular, esta adaptación puede contribuir a una estructura tendinosa más resiliente frente a demandas deportivas intensificadas en la adolescencia.

El fortalecimiento coordinado de cadenas musculares longitudinales y transversales reduce la presencia de asimetrías funcionales que, mantenidas en el tiempo, podrían predisponer a lesiones compensatorias. La actividad descalza estimula ajustes bilaterales continuos, obligando al sistema neuromuscular a equilibrar cargas entre ambos miembros inferiores. Esta activación simétrica mejora la alineación segmentaria y disminuye discrepancias en la distribución de fuerzas durante la marcha y la carrera (Adolph & Hoch, 2019). La consolidación de patrones equilibrados desde edades tempranas reduce el riesgo de sobrecargas unilaterales repetitivas.

La exposición controlada a superficies variadas incrementa la tolerancia tisular frente a demandas mecánicas cambiantes, un principio fundamental en la prevención de lesiones por sobreuso. Cuando los tejidos musculares y ligamentarios se enfrentan progresivamente a diferentes niveles de firmeza, fricción e inclinación, desarrollan una capacidad adaptativa más amplia. Esta variabilidad mecánica fortalece la resiliencia estructural al ampliar el rango de condiciones ante las cuales el sistema puede responder eficazmente (Lieberman, 2012). En contraste, la exposición constante a superficies uniformes puede limitar la adaptabilidad biomecánica.

La mejora en la propiocepción articular derivada del contacto plantar directo fortalece la conciencia corporal y disminuye errores de posicionamiento que podrían desencadenar lesiones agudas. Los receptores articulares y musculares transmiten información sobre ángulos y tensiones articulares, permitiendo ajustes correctivos antes de que se alcance un rango lesivo (Kandel et al., 2013). Este refinamiento propioceptivo resulta especialmente relevante en actividades que implican cambios rápidos de dirección o aterrizajes tras saltos.

La estimulación neuromuscular constante reduce la dependencia excesiva de soportes externos rígidos, favoreciendo el desarrollo de estabilidad intrínseca. Cuando el pie aprende a autorregular su alineación mediante activación muscular coordinada, disminuye la vulnerabilidad ante contextos en los que el

soporte externo no está disponible. Este fortalecimiento intrínseco promueve una estructura más autónoma y resistente a demandas mecánicas imprevistas (Shumway-Cook & Woollacott, 2017).

La consolidación temprana de estabilidad medial del pie puede disminuir el riesgo de disfunciones asociadas con colapso progresivo del arco plantar en etapas posteriores. El fortalecimiento del tibial posterior y musculatura intrínseca, estimulado por actividad descalza, contribuye a mantener una elevación dinámica adecuada del arco longitudinal medial (Rao & Joseph, 1992). Esta estabilidad reduce tensiones excesivas en fascia plantar y estructuras adyacentes, disminuyendo la probabilidad de dolor crónico en la adolescencia.

La coordinación intersegmentaria eficiente distribuye cargas de manera equilibrada a lo largo de la cadena cinética, reduciendo la concentración de estrés en articulaciones específicas. Cuando el pie funciona como una base estable y adaptable, la rodilla y la cadera reciben fuerzas más alineadas con su eje biomecánico, minimizando torsiones anómalas. Esta armonización cinética disminuye el riesgo de síndromes de sobreuso en miembros inferiores (Lieberman, 2012).

La reducción de latencia en respuestas reflejas protectoras fortalece la capacidad de reaccionar ante movimientos inesperados durante actividades deportivas. La información plantar directa acorta el tiempo entre la detección de una perturbación y la activación muscular correctiva, mejorando la seguridad funcional (Proske & Gandevia, 2012). Este mecanismo puede resultar determinante en la prevención de esguinces y caídas.

La adaptación gradual a impactos naturales mejora la capacidad de recuperación tisular tras esfuerzos repetidos. La activación muscular eficiente durante la absorción de fuerzas disminuye el estrés acumulativo sobre estructuras pasivas, favoreciendo procesos de reparación equilibrados (Kandel et al., 2013). Esta capacidad adaptativa contribuye a la sostenibilidad del desempeño físico a largo plazo.

La integración sensoriomotora robusta fortalece la seguridad locomotora en contextos dinámicos y cambiantes. La combinación de retroalimentación táctil,

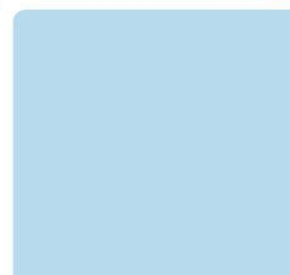
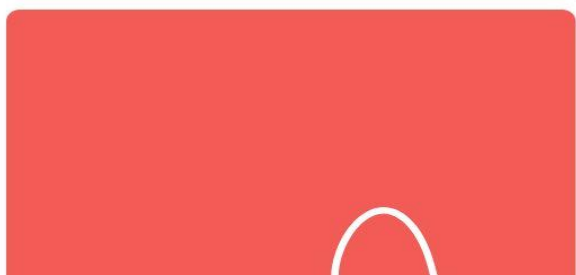
propioceptiva y vestibular optimiza la percepción espacial y la planificación motora, reduciendo errores que podrían derivar en lesiones (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Este refinamiento integral constituye una estrategia preventiva basada en el fortalecimiento funcional más que en la restricción externa.

En conclusión, la actividad descalza implementada de manera progresiva y supervisada en entornos seguros puede desempeñar un papel significativo en la prevención de lesiones futuras al fortalecer estructuras musculoligamentarias, optimizar la integración neurosensorial y mejorar la eficiencia biomecánica global. Estos efectos, sustentados en principios de plasticidad neural, mecanotransducción y aprendizaje motor adaptativo, configuran una base resiliente que favorece la salud musculoesquelética durante el crecimiento y en etapas posteriores de mayor demanda física (Adolph & Hoch, 2019; Kandel et al., 2013; Lieberman, 2012; Proske & Gandevia, 2012; Shumway-Cook & Woollacott, 2017).



CAPITULO VI

GUÍAS PRÁCTICAS PARA PADRES Y ENTRENADORES



Cómo elegir calzado adecuado según la edad

La elección del calzado infantil debe entenderse como una intervención biomecánica indirecta sobre un sistema musculoesquelético en desarrollo continuo. El pie del niño no es una versión reducida del pie adulto, sino una estructura anatómica con predominio cartilaginoso, alta elasticidad ligamentaria y centros de osificación progresiva que modifican su arquitectura a lo largo de la infancia (Evans, 2008). Esta condición implica que cualquier elemento externo —como el calzado— interactúa con tejidos altamente moldeables, capaces de adaptarse favorable o desfavorablemente según las cargas mecánicas recibidas. Desde una perspectiva del desarrollo, el calzado debe considerarse un modulador ambiental que puede facilitar la maduración funcional o, por el contrario, interferir con la integración neuromotora si restringe la movilidad fisiológica del antepié, limita la expansión digital o altera la retroalimentación propioceptiva plantar.

Durante el primer año de vida, cuando el niño aún no ha iniciado la marcha independiente, la literatura científica coincide en que el uso de calzado estructurado carece de justificación biomecánica. En esta etapa, el contacto plantar directo con superficies diversas estimula mecanorreceptores cutáneos fundamentales para la organización cortical sensorial y la adquisición de patrones motores básicos (WHO, 2019). La exposición a estímulos táctiles variados contribuye a la formación de mapas somatosensoriales más precisos, lo cual impacta en la coordinación y el equilibrio futuros. Por tanto, el calzado en lactantes debería limitarse a una función protectora térmica o superficial, empleando materiales blandos, sin suela rígida ni soporte estructural que interfiera con la movilidad espontánea de los dedos o la flexión plantar y dorsiflexión natural del tobillo.

Con el inicio de la bipedestación y los primeros pasos, aproximadamente entre los 12 y 18 meses, el calzado adquiere una función protectora más relevante, pero debe seguir respetando la fisiología del desarrollo motor. Investigaciones sobre marcha infantil indican que caminar descalzo favorece patrones de activación muscular intrínseca más eficientes y mejora el control postural dinámico (Hollander et al., 2017). Cuando se introduce calzado excesivamente

rígido, la reducción de estímulos plantares puede alterar la estrategia de apoyo inicial y prolongar la fase de doble soporte, modificando la cinemática natural del ciclo de marcha. Por ello, en esta etapa se recomienda suela delgada, alta flexibilidad en el antepié y ausencia de elementos correctivos innecesarios.

Desde una perspectiva estructural, el antepié infantil presenta una amplia capacidad de expansión transversal durante la carga. La elección de una puntera estrecha puede generar compresión digital sostenida, condicionando adaptaciones estructurales indeseadas. Estudios epidemiológicos han mostrado asociación entre calzado inadecuado y deformidades digitales tempranas, como hallux valgus juvenil (Mickle et al., 2010). Esta evidencia subraya la necesidad de seleccionar hormas amplias que permitan la abducción fisiológica del hallux y la movilidad independiente de los dedos, elemento crucial para la estabilidad en fase propulsiva.

Entre los 2 y 4 años, el patrón de marcha se vuelve más estable y disminuye la base de sustentación, pero el arco longitudinal medial aún puede no estar definido debido a la persistencia de tejido adiposo plantar. Esta condición, conocida como “pie plano fisiológico”, no constituye una patología en ausencia de dolor o limitación funcional (Evans, 2008). La prescripción prematura de soportes rígidos o plantillas correctivas sin evaluación clínica específica puede reducir la activación de musculatura intrínseca, limitando la autoorganización estructural del arco. Por tanto, el calzado debe permitir que el pie desarrolle su arquitectura de manera progresiva y autónoma.

En edad preescolar, el aumento de la actividad física espontánea implica mayores demandas mecánicas. El calzado debe ofrecer protección frente a impactos moderados, pero sin sobredimensionar la amortiguación. La literatura sugiere que una amortiguación excesiva puede disminuir la retroalimentación sensorial plantar y alterar el control postural fino (Lieberman et al., 2010). El equilibrio entre protección e información sensorial es esencial para consolidar estrategias de estabilidad dinámicas eficientes.

En la etapa escolar temprana (6–9 años), la frecuencia de actividades deportivas organizadas incrementa la exposición a cargas repetitivas. La selección del calzado debe considerar no solo la edad cronológica, sino también el nivel de

maduración biológica y la presencia de cartílagos de crecimiento abiertos. La transmisión de fuerzas torsionales excesivas hacia estructuras inmaduras puede aumentar el riesgo de apofisitis y lesiones por sobreuso (DiFiori et al., 2014). En consecuencia, el calzado deportivo infantil debe priorizar flexibilidad controlada y evitar sistemas de tracción que generen bloqueos rotacionales abruptos.

La adolescencia temprana se caracteriza por un crecimiento óseo acelerado que puede superar temporalmente la adaptación muscular y tendinosa. Este fenómeno genera desequilibrios biomecánicos transitorios y mayor susceptibilidad a dolor en talón, mediopié o antepié. La revisión periódica de la talla del calzado resulta indispensable, ya que la discrepancia entre longitud real del pie y talla del zapato se asocia con incremento en dolor musculoesquelético (Menz et al., 2018). La adaptación frecuente a cambios antropométricos es, por tanto, un principio preventivo fundamental.

El tipo de actividad física constituye un criterio determinante en la elección del calzado. No es biomecánicamente equivalente correr en superficies duras urbanas que practicar deportes en césped natural. Cada entorno modifica la magnitud y dirección de fuerzas de reacción del suelo, condicionando la demanda sobre articulaciones del retropié y mediopié. La adecuación del diseño de la suela debe responder a estas variaciones sin comprometer la movilidad fisiológica del tobillo y las articulaciones metatarsofalángicas.

La rigidez longitudinal del calzado influye directamente en la mecánica del primer radio. Una suela excesivamente rígida puede limitar la dorsiflexión del hallux durante la fase de despegue, alterando el mecanismo de windlass y reduciendo la eficiencia propulsiva. En un pie en desarrollo, esta interferencia repetitiva podría modificar patrones motores consolidados. Por ello, se recomienda evaluar la capacidad de flexión en la línea metatarsofalángica antes de seleccionar el calzado infantil.

El diseño del contrafuerte posterior en el calzado infantil representa un elemento biomecánico de alta relevancia, pues interactúa directamente con la alineación del retropié y la mecánica de la articulación subtalar, la cual desempeña un papel crucial en la adaptación del pie a las irregularidades del terreno. En un pie en desarrollo, cuya laxitud ligamentaria fisiológica permite amplios rangos de

movilidad, la imposición de una contención excesivamente rígida puede restringir la pronación y supinación adaptativas necesarias para la absorción y redistribución de cargas. Desde la perspectiva del desarrollo motor, la estabilidad no debe confundirse con inmovilización; por el contrario, el sistema musculoesquelético infantil requiere estímulos variables que promuevan el fortalecimiento progresivo de la musculatura intrínseca y extrínseca. Diversos estudios sobre maduración del control postural sugieren que la variabilidad motora constituye un componente esencial para la adquisición de estrategias de equilibrio eficientes (Hadders-Algra, 2018). En consecuencia, el contrafuerte ideal debe ofrecer soporte moderado, permitiendo microajustes dinámicos que faciliten la integración neuromuscular sin generar dependencia estructural externa.

El peso del calzado constituye un determinante frecuentemente subestimado en la biomecánica de la marcha infantil, pese a su impacto directo sobre el costo metabólico, la cadencia y la longitud del paso. En niños pequeños, cuya eficiencia locomotora aún se encuentra en proceso de refinamiento, la adición de masa distal incrementa el momento de inercia del miembro inferior y puede alterar la coordinación intersegmentaria. Desde una perspectiva energética, un calzado pesado exige mayor activación muscular para iniciar y detener el movimiento oscilatorio, lo que podría generar fatiga precoz y compensaciones posturales. Investigaciones en análisis de marcha han demostrado que modificaciones en la carga distal afectan parámetros temporoespaciales incluso en adultos (Lieberman et al., 2010), por lo que su influencia en sistemas neuromotores inmaduros podría ser aún más significativa. Por tanto, la selección del calzado infantil debe priorizar ligereza estructural sin sacrificar integridad funcional, equilibrando protección y eficiencia biomecánica.

La dimensión sensorial del pie infantil debe considerarse un componente central en la elección del calzado, dado que la planta alberga una alta densidad de mecanorreceptores cutáneos responsables de transmitir información crítica sobre presión, vibración y textura al sistema nervioso central. Esta información contribuye a la regulación del tono muscular y al ajuste postural anticipatorio. La reducción crónica de estímulos plantares mediante suelas excesivamente gruesas o rígidas podría atenuar la retroalimentación propioceptiva, limitando la

precisión del control motor fino. Estudios sobre exposición habitual al minimalismo han evidenciado diferencias estructurales y funcionales en la musculatura intrínseca del pie en comparación con poblaciones permanentemente calzadas (Hollander et al., 2017). Si bien no se propone la eliminación total del calzado, sí resulta pertinente seleccionar modelos que permitan cierto grado de percepción sensorial, favoreciendo la integración entre estímulo externo y respuesta motora adaptativa.

La anchura y configuración del mediopié en el calzado infantil deben contemplar la expansión fisiológica que ocurre durante la fase de carga del ciclo de marcha, momento en el cual el arco transversal se adapta para distribuir las fuerzas verticales y horizontales. Una compresión lateral sostenida puede alterar la alineación metatarsal y modificar la distribución de presiones plantares, generando puntos de sobrecarga localizados. A largo plazo, estas alteraciones podrían predisponer a hiperqueratosis, dolor metatarsal o cambios estructurales adaptativos. Desde la biomecánica funcional, el pie actúa como una estructura flexible que alterna entre adaptabilidad y rigidez según la fase del movimiento; interferir con esta transición natural puede comprometer la eficiencia locomotora. La selección de hormas amplias y anatómicas, acordes con la morfología real del pie infantil, constituye por tanto una medida preventiva coherente con los principios del desarrollo estructural progresivo (Mickle et al., 2010).

La elección de materiales transpirables y biocompatibles en el calzado infantil no solo responde a criterios de confort, sino también a consideraciones dermatológicas y microbiológicas fundamentales. La piel infantil presenta mayor susceptibilidad a irritaciones y maceración debido a su menor grosor y mayor hidratación relativa. Materiales sintéticos no transpirables pueden favorecer acumulación de humedad, alteraciones del microbioma cutáneo y aparición de infecciones fúngicas superficiales. Desde una perspectiva integral de salud del pie, la prevención de afecciones cutáneas forma parte de la estrategia global de cuidado durante el crecimiento. La ventilación adecuada, combinada con ajustes que eviten fricción excesiva, contribuye a mantener la integridad de la barrera cutánea y a prevenir procesos inflamatorios que podrían alterar la marcha por dolor o incomodidad persistente.

El coeficiente de fricción de la suela debe seleccionarse en función de las superficies predominantes en el entorno habitual del niño, considerando que la interacción entre suela y suelo determina la magnitud de fuerzas de reacción y el riesgo de deslizamiento o bloqueo rotacional. Una tracción excesiva, particularmente en superficies sintéticas deportivas, puede generar fuerzas torsionales elevadas que se transmiten hacia la rodilla y la cadera, mientras que una suela demasiado lisa incrementa el riesgo de caídas. En poblaciones pediátricas, donde los cartílagos de crecimiento permanecen abiertos, la exposición repetitiva a fuerzas rotacionales intensas podría incrementar la vulnerabilidad a lesiones por sobreuso (DiFiori et al., 2014). En consecuencia, la selección óptima debe equilibrar estabilidad y libertad rotacional controlada, evitando extremos que comprometan la seguridad o la adaptación biomecánica.

En niños con hiperlaxitud ligamentaria generalizada, condición relativamente frecuente en la infancia, la elección del calzado requiere especial atención, aunque no necesariamente mayor rigidez. La hiperlaxitud implica mayor rango articular pasivo, pero no siempre se asocia a disfunción. La evidencia sugiere que el fortalecimiento muscular y el entrenamiento propioceptivo resultan estrategias más eficaces que la inmovilización estructural permanente (Hadders-Algra, 2018). Un calzado excesivamente restrictivo podría disminuir la demanda neuromuscular, reduciendo la oportunidad de desarrollo activo de estabilidad. Por tanto, la individualización debe basarse en evaluación clínica integral, priorizando intervenciones que fomenten competencia funcional en lugar de dependencia pasiva.

La transición entre distintos tipos de calzado —escolar, deportivo o recreativo— representa un cambio biomecánico que puede modificar la altura del talón, la rigidez longitudinal y la distribución de presiones plantares. Cambios abruptos en estos parámetros pueden alterar el ángulo tibial anterior y la mecánica del tobillo, generando molestias transitorias o adaptación muscular acelerada. La adaptación progresiva permite al sistema neuromuscular reorganizar patrones de activación y redistribuir cargas sin generar estrés excesivo. Desde la perspectiva de prevención, se recomienda introducir nuevos modelos de manera gradual, especialmente durante periodos de crecimiento acelerado.

La educación de padres y cuidadores constituye un componente estructural en la adecuada elección del calzado infantil, pues las decisiones suelen estar influenciadas por factores estéticos, comerciales o culturales que no siempre coinciden con principios biomecánicos. Existe una percepción extendida de que mayor rigidez equivale a mayor protección, pese a que la literatura científica no respalda esta afirmación en pies sanos en desarrollo (Evans, 2008). La difusión de conocimiento basado en evidencia permite adoptar decisiones informadas que respeten la fisiología del crecimiento y eviten intervenciones innecesarias. La comprensión del pie como órgano dinámico y adaptable resulta clave para orientar prácticas coherentes con la salud musculoesquelética a largo plazo.

En síntesis, la elección del calzado según la edad debe fundamentarse en una comprensión profunda de la interacción entre desarrollo biológico, biomecánica funcional y neuroplasticidad sensorial. El objetivo no es corregir preventivamente una estructura sana ni anticipar patologías inexistentes, sino acompañar el proceso madurativo permitiendo que el pie despliegue su potencial adaptativo intrínseco. La evidencia científica converge en señalar que la movilidad controlada, la estimulación sensorial adecuada y la ausencia de restricciones innecesarias favorecen un desarrollo estructural armonioso (Hollander et al., 2017; WHO, 2019). Por tanto, el calzado infantil debe concebirse como una herramienta facilitadora del movimiento natural y no como un dispositivo correctivo sistemático en ausencia de indicación clínica específica.

Actividades recomendadas para fortalecer los pies

El fortalecimiento del pie infantil debe concebirse como un proceso de estimulación neuromuscular progresiva que respete los principios del desarrollo motor y la maduración osteoligamentaria. Lejos de centrarse exclusivamente en ejercicios aislados, la literatura contemporánea sugiere que el fortalecimiento efectivo emerge de la exposición regular a contextos motores variados que desafían la estabilidad, la coordinación y la adaptación sensorial (Hadders-Algra, 2018). El pie funciona como una unidad integrada compuesta por musculatura intrínseca y extrínseca, fascias, articulaciones y receptores sensoriales que operan sinérgicamente para sostener el peso corporal y permitir la locomoción eficiente. En consecuencia, las actividades recomendadas deben promover tanto

la activación muscular como la integración propioceptiva, evitando enfoques reduccionistas que prioricen únicamente la fuerza isométrica sin considerar el control dinámico.

La marcha descalza en superficies seguras y variadas constituye una de las intervenciones más simples y fisiológicamente coherentes para estimular la musculatura intrínseca del pie. Caminar sobre arena, césped natural o superficies ligeramente irregulares incrementa la demanda de estabilización del arco longitudinal medial y activa mecanismos de ajuste fino en el retropié y mediopié. Estudios comparativos han evidenciado que poblaciones que crecen con mayor exposición al descalzamiento presentan estructuras plantares más robustas y mayor activación intrínseca (Hollander et al., 2017). Esta práctica favorece la integración sensoriomotora al exigir ajustes constantes ante cambios en la textura y consistencia del terreno, fortaleciendo la capacidad adaptativa del sistema neuromuscular.

Los juegos de equilibrio unipodal representan una estrategia altamente eficaz para mejorar la estabilidad del complejo tobillo-pie, particularmente durante la infancia media, cuando el sistema vestibular y somatosensorial continúa refinándose. Mantener la postura sobre un solo pie, especialmente con variaciones como cerrar los ojos o sostener un objeto ligero, incrementa la demanda propioceptiva y estimula la coactivación de musculatura peronea y tibial posterior. Desde la perspectiva del aprendizaje motor, la variabilidad de la tarea favorece la capacidad de adaptación y reorganización neural (Hadders-Algra, 2018). Estas actividades no solo fortalecen estructuras musculares, sino que consolidan estrategias de control postural anticipatorio fundamentales para la prevención de lesiones.

El ejercicio de “agarre digital” mediante la recogida de objetos pequeños con los dedos del pie promueve la activación específica de músculos intrínsecos como el flexor corto de los dedos y el abductor del hallux. Aunque aparentemente simple, esta actividad contribuye a la estabilización del arco plantar al reforzar la función de soporte dinámico que complementa la tensión pasiva de la fascia plantar. Investigaciones sobre entrenamiento intrínseco han demostrado mejoras en la altura del arco y en la distribución de presiones plantares tras programas

sistemáticos de fortalecimiento (Mickle et al., 2016). Este tipo de ejercicio debe realizarse de manera lúdica y progresiva, evitando fatiga excesiva.

Caminar de puntillas constituye un estímulo efectivo para fortalecer la musculatura plantar y el tríceps sural, incrementando la rigidez funcional del arco durante la fase propulsiva. Sin embargo, su implementación debe ser controlada y breve, especialmente en niños pequeños, para evitar sobrecarga repetitiva en el tendón de Aquiles o en la apófisis calcánea. La dosificación adecuada se alinea con los principios de prevención de lesiones por sobreuso descritos en poblaciones pediátricas activas (DiFiori et al., 2014). La práctica intermitente y supervisada puede mejorar la capacidad de absorción y liberación elástica de energía durante la marcha y la carrera.

Los desplazamientos laterales y en zigzag sobre superficies estables favorecen la activación de musculatura estabilizadora del retropié y mejoran la coordinación intersegmentaria. Estas tareas incrementan la demanda de control frontal y transversal, dimensiones frecuentemente menos estimuladas en movimientos lineales. Desde una perspectiva biomecánica, el fortalecimiento tridimensional del pie resulta esencial para responder a fuerzas multidireccionales propias de actividades deportivas infantiles. La integración de cambios de dirección progresivos contribuye a desarrollar resiliencia mecánica y coordinación neuromuscular.

Saltar en superficies blandas y seguras estimula la función elástica del complejo pie-tobillo, promoviendo la capacidad de almacenar y liberar energía en la fascia plantar y el tendón de Aquiles. La actividad pliométrica ligera, adaptada a la edad, mejora la rigidez funcional necesaria para la eficiencia locomotora. Sin embargo, su introducción debe respetar la maduración ósea y evitar volúmenes excesivos, en concordancia con las recomendaciones de prevención de lesiones por sobreuso en jóvenes atletas (DiFiori et al., 2014). La progresión gradual es esencial para evitar estrés repetitivo en estructuras inmaduras.

El uso de superficies inestables moderadas, como colchonetas blandas o almohadillas de equilibrio, incrementa la activación propioceptiva del tobillo y pie. Estas herramientas deben emplearse como complemento y no sustituto de experiencias naturales. La evidencia sugiere que el entrenamiento propioceptivo

mejora la estabilidad dinámica y reduce el riesgo de esguinces recurrentes (McKeon & Hertel, 2008). En la infancia, la implementación debe priorizar el componente lúdico para asegurar adherencia y motivación.

La práctica de actividades como la gimnasia básica, el baile o el juego libre que implican desplazamientos variados promueve el fortalecimiento global del pie dentro de patrones motores funcionales. Estas disciplinas integran flexión, extensión, rotación y apoyo en diferentes planos, favoreciendo la coordinación compleja. La especialización temprana excesiva puede limitar esta diversidad motora, reduciendo oportunidades de desarrollo integral (DiFiori et al., 2014).

La escalada recreativa en estructuras seguras y adaptadas a la edad constituye una actividad altamente integradora para el fortalecimiento del complejo pie-tobillo, dado que exige agarre digital activo, flexión plantar sostenida y ajustes constantes de la presión plantar en diferentes ángulos articulares. Desde una perspectiva biomecánica, el acto de trepar implica la generación de fuerzas en cadena cerrada que activan simultáneamente musculatura intrínseca —como interóseos y lumbricales— y extrínseca —como flexores largos y peroneos—, favoreciendo la sinergia funcional. Además, la escalada estimula la planificación motora anticipatoria, ya que el niño debe calcular la ubicación del siguiente apoyo, promoviendo integración visuoespacial y propioceptiva. Este tipo de actividad multidimensional responde a los principios del aprendizaje motor, en los cuales la variabilidad y la resolución de problemas favorecen adaptaciones neuromusculares duraderas (Hadders-Algra, 2018). Por tanto, la escalada recreativa no solo fortalece estructuras, sino que enriquece la competencia motora global.

Los ejercicios de desplazamiento sobre líneas rectas o curvas dibujadas en el suelo, simulando caminar sobre una superficie estrecha, constituyen una estrategia eficaz para entrenar la alineación longitudinal del pie y el control mediolateral del tobillo. Desde la neurofisiología del equilibrio, este tipo de tarea incrementa la demanda de información somatosensorial plantar y vestibular, obligando al sistema nervioso central a realizar ajustes posturales continuos para evitar la pérdida de estabilidad. La activación coordinada del tibial posterior, los peroneos y la musculatura intrínseca contribuye a sostener el arco longitudinal

durante la fase de apoyo unipodal. La repetición controlada de esta actividad fortalece patrones de coactivación muscular que resultan esenciales en la prevención de inestabilidad crónica de tobillo (McKeon & Hertel, 2008). Además, la incorporación de variaciones —como transportar un objeto ligero— aumenta la complejidad sin comprometer la seguridad.

Caminar sobre los talones durante intervalos breves representa una intervención dirigida al fortalecimiento de la musculatura dorsiflexora, particularmente del tibial anterior, cuya función es esencial para el control excéntrico del pie durante el contacto inicial en la marcha. En muchos contextos cotidianos y deportivos predomina la activación plantarflexora, lo cual puede generar desequilibrios si no se entrena adecuadamente la musculatura antagonista. Desde una perspectiva biomecánica, la adecuada activación dorsiflexora contribuye a mantener el clearance adecuado durante la fase de oscilación y previene compensaciones proximales en rodilla y cadera. La práctica debe realizarse en superficies planas y seguras, con supervisión y en periodos cortos, respetando la capacidad de fatiga muscular infantil. La evidencia sobre prevención de lesiones por sobreuso subraya la importancia del equilibrio entre grupos musculares para reducir estrés repetitivo (DiFiori et al., 2014).

Los juegos que implican cambios rápidos de ritmo —aceleraciones, frenadas y reinicios súbitos— estimulan la capacidad del pie para adaptarse a variaciones abruptas de carga vertical y horizontal. Desde el punto de vista de la mecánica tisular, estos cambios demandan absorción excéntrica eficiente por parte del tríceps sural y estabilización activa del arco plantar para evitar colapso excesivo. La exposición progresiva a estas demandas favorece el desarrollo de resiliencia mecánica y optimiza la sincronización entre sistema nervioso y musculatura periférica. Sin embargo, la dosificación debe ser cuidadosamente planificada, ya que volúmenes excesivos en edades con cartílagos de crecimiento abiertos pueden incrementar riesgo de lesiones por sobreuso (DiFiori et al., 2014). La clave radica en combinar intensidad moderada con suficiente recuperación.

Las actividades acuáticas en aguas poco profundas ofrecen un entorno ideal para el fortalecimiento del pie con reducción significativa de carga axial. La resistencia hidrodinámica proporciona estímulo muscular uniforme en múltiples

direcciones, permitiendo activar tanto flexores como extensores plantares sin impacto repetitivo. Desde una perspectiva terapéutica, el medio acuático facilita el entrenamiento coordinativo en niños con menor tolerancia a la carga terrestre, favoreciendo la activación progresiva sin sobrecargar estructuras inmaduras. Además, la variabilidad de empuje del agua estimula ajustes posturales continuos, reforzando la integración sensorial. Este tipo de actividad resulta particularmente útil como complemento en programas preventivos o de readaptación funcional.

Las caminatas regulares en entornos naturales con variaciones de pendiente, textura y consistencia superficial constituyen una estrategia integral de fortalecimiento funcional. A diferencia de superficies planas y homogéneas, los terrenos naturales exigen microajustes constantes del retropié y mediopié, estimulando la musculatura estabilizadora profunda. La literatura sobre exposición habitual al descalzamiento y terrenos variables sugiere adaptaciones estructurales favorables en el arco plantar (Hollander et al., 2017). Estas experiencias enriquecen el repertorio motor del niño y promueven una relación más eficiente entre percepción sensorial y respuesta muscular.

El entrenamiento coordinativo mediante manipulación de pelotas pequeñas con los pies —rodarlas, detenerlas o dirigir las hacia objetivos— estimula la precisión motora fina y la activación selectiva de musculatura intrínseca. Este tipo de ejercicio fortalece el control segmentario independiente de los dedos, contribuyendo a la estabilidad dinámica del antepié. Además, la tarea implica procesamiento visuomotor y planificación anticipatoria, integrando componentes cognitivos al fortalecimiento físico. Desde la perspectiva del aprendizaje motor, la combinación de desafío cognitivo y estímulo muscular favorece consolidación sináptica y mejora del control voluntario (Hadders-Algra, 2018).

Los juegos de imitación animal, como caminar “como oso” o “como cangrejo”, generan patrones de carga no convencionales que estimulan el apoyo plantar en ángulos variados. Estas posiciones modifican la distribución habitual de presiones, activando regiones plantares menos utilizadas en la marcha convencional. El fortalecimiento resultante es global y tridimensional, promoviendo resiliencia mecánica ante situaciones imprevistas. Además, el

carácter lúdico incrementa la adherencia y la motivación, elementos fundamentales para la consistencia en programas preventivos infantiles.

La alternancia entre actividades estáticas —como mantener postura unipodal— y dinámicas —como saltos suaves o desplazamientos laterales— favorece el desarrollo equilibrado entre fuerza muscular y control postural. Desde el punto de vista neurofisiológico, esta combinación estimula tanto mecanismos reflejos rápidos como ajustes voluntarios anticipatorios. La integración de ambos componentes fortalece la capacidad adaptativa del sistema pie-tobillo ante demandas variables. El enfoque debe evitar la especialización temprana excesiva, promoviendo diversidad motora coherente con principios de desarrollo saludable (DiFiori et al., 2014).

La progresión en intensidad, volumen y complejidad de las actividades debe basarse en la edad biológica y no exclusivamente en la cronológica, considerando que los picos de crecimiento pueden generar vulnerabilidad temporal en estructuras musculotendinosas. La supervisión profesional resulta aconsejable en niños que practican deporte organizado con alta frecuencia. La prevención de lesiones por sobreuso depende de una dosificación adecuada y de la inclusión de periodos de recuperación suficientes. La adaptación progresiva permite que el tejido conectivo aumente su tolerancia mecánica sin generar microtrauma acumulativo.

En síntesis, las actividades destinadas a fortalecer el pie infantil deben integrarse dentro de un enfoque global de desarrollo motor que priorice variabilidad, progresión controlada y estímulo sensorial enriquecido. El fortalecimiento efectivo no se limita a incrementar fuerza aislada, sino que implica optimizar la coordinación intermuscular, la estabilidad dinámica y la capacidad de adaptación a entornos cambiantes. La evidencia científica respalda la implementación de experiencias motoras diversas y lúdicas como medio para promover pies estructuralmente resilientes y funcionalmente competentes (Hadders-Algra, 2018; Hollander et al., 2017; McKeon & Hertel, 2008).

Ejercicios de movilidad, estiramiento y propiocepción

La movilidad articular del complejo pie-tobillo constituye un componente esencial del desarrollo biomecánico infantil, dado que permite la adecuada distribución de cargas, la absorción de impactos y la eficiencia propulsiva durante la marcha y la carrera. En etapas de crecimiento acelerado, la discrepancia temporal entre elongación ósea y adaptación musculotendinosa puede generar restricciones funcionales que alteren la cinemática normal del tobillo y del mediopié. Desde una perspectiva neurofisiológica, la movilidad no solo depende de la extensibilidad tisular, sino también de la regulación del tono muscular mediada por circuitos reflejos espinales y suprasegmentarios. La inclusión sistemática de ejercicios de movilidad activa y controlada favorece la preservación de rangos articulares fisiológicos sin inducir laxitud excesiva. Además, la movilidad adecuada optimiza la función del mecanismo de windlass y la capacidad elástica de la fascia plantar, elementos fundamentales para la eficiencia mecánica del pie en crecimiento (Hertel & Corbett, 2019).

Los ejercicios de movilidad en dorsiflexión del tobillo resultan particularmente relevantes en la infancia, ya que la limitación de este rango articular se ha asociado con alteraciones compensatorias en la rodilla y el mediopié. Movimientos activos de flexión dorsal en cadena cerrada —como desplazar la rodilla hacia adelante manteniendo el talón en contacto con el suelo— permiten mejorar la extensibilidad del complejo gastrocnemio-sóleo sin generar estrés excesivo. La literatura sugiere que déficits de dorsiflexión pueden incrementar la pronación compensatoria y modificar la distribución de presiones plantares (Hertel & Corbett, 2019). Por ello, la práctica regular y progresiva de este tipo de movilidad contribuye a mantener la alineación funcional y reducir la sobrecarga en estructuras pasivas.

La movilidad del hallux y de las articulaciones metatarsofalángicas desempeña un papel determinante en la fase de despegue del ciclo de marcha. Ejercicios activos de extensión y flexión digital controlada favorecen la lubricación articular y mantienen la capacidad de dorsiflexión necesaria para activar adecuadamente el mecanismo de tensión fascial. La restricción en la movilidad del primer radio puede alterar la eficiencia propulsiva y generar compensaciones proximales.

Desde la perspectiva preventiva, la movilización regular y consciente de los dedos del pie refuerza la independencia segmentaria y la coordinación intrínseca, contribuyendo a una distribución homogénea de cargas durante actividades dinámicas.

Los estiramientos del tríceps sural deben implementarse considerando la maduración del sistema musculotendinoso infantil. La elongación sostenida y suave, sin rebotes balísticos, favorece la adaptación progresiva del tejido conectivo y la regulación del reflejo miotático. En niños físicamente activos, el acortamiento relativo del gastrocnemio puede asociarse a dolor en talón o a tensiones excesivas sobre la apófisis calcánea, especialmente durante picos de crecimiento (DiFiori et al., 2014). La dosificación adecuada —mantener el estiramiento entre 20 y 30 segundos, sin dolor— permite optimizar la extensibilidad sin comprometer la estabilidad articular.

El estiramiento específico de la fascia plantar mediante dorsiflexión controlada del hallux representa una intervención relevante dentro de los programas de movilidad infantil, particularmente en contextos de incremento súbito en la carga física o durante periodos de crecimiento acelerado. Desde el punto de vista biomecánico, la fascia plantar actúa como una estructura tensional clave en el mantenimiento del arco longitudinal medial y en la transmisión eficiente de fuerzas durante la fase propulsiva del ciclo de marcha. La activación del denominado mecanismo de windlass depende en gran medida de la movilidad adecuada del primer radio y de la extensibilidad fascial. La aplicación sistemática de estiramientos suaves, sin provocar dolor, favorece la reorganización fisiológica de las fibras colágenas y contribuye a mantener la elasticidad funcional del tejido conectivo. Sin embargo, la literatura advierte que intervenciones excesivamente agresivas pueden generar microirritación en tejidos inmaduros, por lo que la dosificación debe respetar principios de progresión gradual y ausencia de sintomatología (DiFiori et al., 2014).

La movilidad activa en inversión y eversión del retropié cumple una función esencial en la preservación de la adaptabilidad subtalar, articulación responsable de modular la pronación y supinación necesarias para absorber impactos y adaptarse a superficies irregulares. En el pie infantil, cuya laxitud ligamentaria

fisiológica permite amplios rangos de movimiento, el objetivo no es incrementar amplitud extrema, sino consolidar control neuromuscular dentro del rango fisiológico. La ejecución lenta y consciente de estos movimientos estimula la activación coordinada de peroneos, tibial posterior y musculatura intrínseca, reforzando la estabilidad dinámica. Desde la neurociencia del movimiento, la repetición de patrones controlados fortalece circuitos sinápticos implicados en la planificación y ajuste postural (Hadders-Algra, 2018). Así, la movilidad subtalar controlada contribuye tanto a la integridad estructural como a la eficiencia adaptativa.

Los ejercicios propioceptivos en apoyo unipodal con manipulación de variables sensoriales —como reducción del input visual o introducción de estímulos externos leves— constituyen herramientas fundamentales para optimizar la integración sensoriomotora. El sistema somatosensorial plantar, junto con el vestibular y el visual, participa activamente en la regulación del equilibrio estático y dinámico. Cuando se reduce deliberadamente la información visual, se incrementa la dependencia de aferencias plantares y musculotendinosas, fortaleciendo la sensibilidad propioceptiva. Estudios en poblaciones jóvenes han demostrado que programas estructurados de entrenamiento propioceptivo reducen la incidencia de inestabilidad crónica de tobillo y mejoran el control dinámico (McKeon & Hertel, 2008). En la infancia, estas tareas deben plantearse en formato lúdico y progresivo para garantizar adherencia y seguridad.

El empleo moderado de superficies inestables, como almohadillas de equilibrio o colchonetas blandas, potencia las respuestas reflejas rápidas del complejo pie-tobillo ante perturbaciones inesperadas. Desde la fisiología neuromuscular, estas respuestas automáticas involucran activación anticipatoria y correctiva mediada por circuitos espinales y corticales. La exposición controlada a inestabilidad estimula la coactivación muscular y mejora la rigidez funcional necesaria para proteger articulaciones durante movimientos imprevistos. No obstante, la introducción de estas herramientas debe ser gradual, evitando cargas prolongadas que puedan generar fatiga excesiva en tejidos inmaduros. La progresión adecuada permite desarrollar resiliencia mecánica sin comprometer la seguridad estructural.

La movilidad en cadena cinética cerrada que integra dorsiflexión de tobillo con flexión de rodilla y ligera inclinación anterior del tronco representa un enfoque funcional que reconoce la interdependencia entre segmentos corporales. El pie no actúa de manera aislada; su comportamiento está íntimamente vinculado a la alineación tibial y femoral. Restricciones en la movilidad distal pueden inducir compensaciones proximales que alteren la mecánica global de la extremidad inferior. La práctica de ejercicios integrados favorece la coordinación intersegmentaria y fortalece patrones de movimiento coherentes con la marcha y la carrera. Esta perspectiva sistémica coincide con modelos contemporáneos de control motor que enfatizan la organización en redes funcionales más que en segmentos aislados (Hadders-Algra, 2018).

Los desplazamientos laterales lentos con énfasis en el control consciente del apoyo plantar estimulan la estabilidad mediolateral del tobillo y fortalecen la musculatura peronea, clave en la prevención de esguinces. Durante estos movimientos, el niño aprende a distribuir el peso de manera uniforme y a percibir variaciones en la presión plantar. La repetición controlada refuerza la memoria motora y optimiza la respuesta ante perturbaciones laterales inesperadas. Además, el componente cognitivo de atención al apoyo incrementa la calidad del movimiento, promoviendo patrones más eficientes y seguros.

El ejercicio de “doming” o elevación activa del arco plantar sin flexionar los dedos constituye una técnica específica de fortalecimiento intrínseco que favorece la activación selectiva del abductor del hallux y músculos interóseos. Este ejercicio mejora la capacidad del pie para sostener el arco longitudinal medial mediante contracción voluntaria, complementando la tensión pasiva de la fascia plantar. Investigaciones sobre entrenamiento intrínseco han evidenciado mejoras en la función plantar tras programas estructurados (Mickle et al., 2016). La ejecución correcta requiere supervisión inicial para evitar compensaciones digitales excesivas.

Los estiramientos dinámicos previos a la actividad física cumplen una función preparatoria esencial al aumentar la temperatura muscular y mejorar la viscoelasticidad tisular. A diferencia de los estiramientos estáticos prolongados

antes del ejercicio intenso, las movilizaciones dinámicas mantienen activación neuromuscular adecuada y reducen sensación de rigidez inicial. En niños físicamente activos, esta preparación puede contribuir a disminuir riesgo de sobrecarga en fases iniciales del entrenamiento (DiFiori et al., 2014).

La coordinación simultánea de movimientos de tobillo con acciones de los miembros superiores representa una estrategia avanzada dentro del entrenamiento neuromotor infantil, dado que integra control distal y proximal en patrones cinéticos funcionales. Desde la perspectiva de la neurociencia del movimiento, la organización motora no se produce de manera segmentaria aislada, sino a través de redes interconectadas que sincronizan múltiples grupos musculares en función de objetivos contextuales (Hadders-Algra, 2018). Cuando el niño realiza, por ejemplo, dorsiflexión activa del tobillo mientras ejecuta movimientos rítmicos con los brazos, se incrementa la demanda de coordinación interhemisférica y de planificación motora anticipatoria. Esta integración favorece la eficiencia de las cadenas musculares longitudinales y cruzadas, esenciales para la estabilidad durante la marcha y la carrera. Además, la combinación de segmentos corporales en tareas coordinativas fortalece la capacidad de adaptación frente a perturbaciones externas, optimizando la sincronización neuromuscular global y consolidando patrones motores más estables y eficientes.

El entrenamiento del control excéntrico en descensos suaves, como bajar lentamente de un escalón bajo con apoyo unilateral, constituye una intervención clave para mejorar la capacidad de absorción de impacto del complejo pie-tobillo. Desde el punto de vista biomecánico, la contracción excéntrica del tríceps sural y de la musculatura intrínseca permite modular la velocidad de descenso y distribuir progresivamente la carga hacia estructuras óseas y tendinosas. En niños en crecimiento, esta capacidad resulta particularmente relevante, dado que los tejidos conectivos deben adaptarse a incrementos graduales de carga sin generar microtrauma acumulativo (DiFiori et al., 2014). La práctica sistemática de descensos controlados fortalece la resiliencia mecánica y mejora la percepción del apoyo plantar, reduciendo la probabilidad de movimientos bruscos descoordinados. Asimismo, este tipo de ejercicio contribuye a la

estabilidad funcional de rodilla y cadera al integrar la extremidad inferior como una unidad cinética coherente.

La alternancia planificada entre movilidad activa y estiramiento pasivo representa un principio fundamental para mantener el equilibrio entre estabilidad estructural y flexibilidad funcional en el pie infantil. La movilidad activa estimula la contracción muscular voluntaria dentro del rango articular fisiológico, reforzando el control neuromuscular y la conciencia propioceptiva. Por su parte, el estiramiento pasivo suave favorece la extensibilidad del tejido conectivo y contribuye a la reorganización colágena cuando se aplica sin dolor ni rebote balístico. Desde la fisiología del desarrollo, los periodos de crecimiento acelerado pueden generar tensiones relativas en la unidad músculo-tendinosa, lo que justifica intervenciones preventivas moderadas que mantengan la amplitud articular adecuada. La combinación equilibrada de ambos enfoques previene tanto la rigidez excesiva como la laxitud incontrolada, optimizando la eficiencia mecánica y la estabilidad dinámica del arco plantar (Hertel & Corbett, 2019).

La conciencia corporal durante la ejecución de ejercicios de movilidad y propiocepción constituye un componente esencial para maximizar la calidad del estímulo neuromuscular. Desde el marco teórico del aprendizaje motor, la atención dirigida hacia la percepción interna del movimiento favorece la precisión de la activación muscular y la consolidación de patrones motores refinados (Hadders-Algra, 2018). Cuando el niño se concentra en sentir la distribución del peso sobre el antepié, el talón y los bordes laterales, se fortalece la discriminación sensorial plantar y se optimiza la respuesta adaptativa ante cambios de superficie. Esta educación somatosensorial temprana contribuye a desarrollar esquemas corporales más precisos, esenciales para la coordinación eficiente en actividades deportivas y recreativas. La calidad del movimiento, más que la cantidad de repeticiones, debe ser el objetivo central en programas preventivos infantiles.

La incorporación de respiración controlada durante estiramientos y ejercicios de movilidad no solo favorece la relajación muscular, sino que también modula el tono a través de mecanismos autonómicos y reflejos. La respiración lenta y profunda activa predominantemente el sistema parasimpático, reduciendo la

activación simpática asociada a la tensión muscular excesiva. En el contexto del pie infantil, donde el equilibrio entre activación y relajación resulta crucial para preservar rangos articulares fisiológicos, la sincronización respiratoria facilita mayor amplitud sin inducir dolor. Además, la coordinación entre respiración y movimiento promueve un patrón motor más armónico, integrando aspectos fisiológicos y psicológicos en la práctica corporal. Esta aproximación integral coincide con modelos contemporáneos de entrenamiento que enfatizan la interacción mente-cuerpo en el desarrollo motor.

La frecuencia de los ejercicios de movilidad y propiocepción debe diseñarse bajo el principio de estímulo regular y moderado, evitando tanto la sobrecarga excesiva como la práctica esporádica insuficiente. Desde la fisiología de la adaptación tisular, los tejidos conectivos responden favorablemente a cargas repetidas y progresivas que permiten remodelación colágena sin inducir inflamación persistente. En población pediátrica, la constancia resulta más relevante que la intensidad elevada, dado que el objetivo principal es consolidar patrones de movimiento saludables a largo plazo. Programas breves realizados varias veces por semana pueden generar adaptaciones sostenidas sin interferir con otras actividades recreativas o académicas. La planificación adecuada reduce el riesgo de fatiga acumulativa y respeta los tiempos biológicos de recuperación (DiFiori et al., 2014).

La supervisión profesional adquiere relevancia cuando existen antecedentes de dolor recurrente, limitación funcional o historial de lesiones previas en el complejo pie-tobillo. Una evaluación clínica integral permite identificar posibles restricciones articulares, déficits de fuerza específica o alteraciones en la alineación biomecánica que requieran intervenciones individualizadas. La literatura sobre prevención secundaria en jóvenes atletas subraya la importancia de programas personalizados para reducir recurrencia de inestabilidad (McKeon & Hertel, 2008). En este sentido, la integración de movilidad, estiramiento y propiocepción debe ajustarse a las características particulares del niño, considerando su edad biológica, nivel de actividad y patrón de crecimiento.

En síntesis, los ejercicios de movilidad, estiramiento y propiocepción constituyen pilares interdependientes en la preservación de la funcionalidad del pie infantil y

en la promoción de un desarrollo biomecánico armonioso. La evidencia científica respalda intervenciones progresivas que integren control neuromuscular, regulación del tono y adaptación estructural dentro de rangos fisiológicos (Hertel & Corbett, 2019; Hadders-Algra, 2018). Al fomentar movilidad consciente, estabilidad dinámica y elasticidad equilibrada, se fortalece la capacidad adaptativa del sistema pie-tobillo frente a las demandas cambiantes del crecimiento y la actividad física. La implementación sistemática y supervisada de estos principios no solo previene disfunciones futuras, sino que consolida una base sólida para la competencia motora a lo largo del ciclo vital.

Señales de alerta para consultar a un especialista

La identificación temprana de señales de alarma en el desarrollo del pie infantil constituye un componente esencial de la prevención secundaria en salud musculoesquelética pediátrica. Aunque el pie plano flexible es considerado fisiológico durante los primeros años de vida, especialmente antes de los seis años, la persistencia de alteraciones estructurales acompañadas de dolor, limitación funcional o asimetrías marcadas debe motivar evaluación especializada (Evans, 2008; Staheli, 1999). El proceso de maduración del arco longitudinal medial es gradual y depende tanto de factores biomecánicos como neuromusculares; sin embargo, cuando se observa colapso excesivo del retropié con valgo pronunciado, fatiga temprana al caminar o rechazo a la actividad física, puede existir una disfunción más allá de la variabilidad normal del desarrollo (Pfeiffer et al., 2006). Desde la perspectiva clínica, el dolor persistente en la región plantar, el talón o el mediopié no debe atribuirse automáticamente al crecimiento, pues la evidencia demuestra que el dolor no es un hallazgo habitual en el pie plano flexible fisiológico (Rome et al., 2010). Por tanto, uno de los primeros indicadores para consultar a un especialista en ortopedia pediátrica o fisioterapia es la presencia de dolor recurrente asociado a la carga o al ejercicio.

Otra señal de alerta relevante es la rigidez del pie, particularmente cuando la movilidad subtalar o mediotarsiana se encuentra limitada. A diferencia del pie plano flexible, que corrige su alineación al ponerse en puntas o al descargar peso, el pie plano rígido mantiene su colapso estructural independientemente de la posición, lo cual puede indicar patologías como coaliciones tarsales o

alteraciones congénitas estructurales (Mosca, 2010). La restricción del movimiento, acompañada de dolor en la adolescencia temprana, puede relacionarse con fusiones óseas anómalas que comprometen la biomecánica normal del retropié. Desde el punto de vista funcional, la rigidez impide la adecuada absorción de impactos y altera la progresión del centro de presión durante la marcha, generando sobrecargas proximales en rodilla y cadera (Neumann, 2017). Esta condición exige evaluación por imágenes y valoración especializada, pues su abordaje difiere sustancialmente del manejo conservador habitual del pie flexible.

El dolor en el talón, particularmente en niños activos entre 8 y 12 años, puede constituir una manifestación de apofisitis calcánea o enfermedad de Sever, proceso inflamatorio asociado a la tracción repetitiva del tendón de Aquiles sobre la apófisis del calcáneo en crecimiento (DiFiori et al., 2014). Aunque suele relacionarse con picos de crecimiento y actividad deportiva intensa, la persistencia del dolor, la cojera o la limitación para participar en actividades recreativas son indicadores claros para consulta especializada. La evidencia sugiere que el diagnóstico temprano permite instaurar intervenciones conservadoras efectivas, incluyendo modificación de carga, estiramientos específicos y ajustes en el calzado (Micheli & Ireland, 1987). Ignorar estos síntomas puede favorecer compensaciones biomecánicas que alteren patrones de marcha y aumenten el riesgo de lesiones secundarias.

La presencia de asimetrías marcadas entre ambos pies también constituye un motivo relevante de evaluación. Si un pie presenta colapso evidente del arco mientras el otro mantiene alineación relativamente neutra, o si existe diferencia significativa en la rotación del retropié, podría sospecharse una alteración estructural unilateral o un compromiso neuromuscular subyacente (Staheli, 1999). Las asimetrías persistentes pueden repercutir en la alineación de la pelvis y en la distribución de cargas durante la marcha, generando adaptaciones posturales compensatorias. Desde el enfoque clínico integral, la evaluación debe considerar no solo el pie sino toda la cadena cinética inferior, pues las alteraciones distales pueden tener repercusiones ascendentes (Neumann, 2017). La detección temprana de asimetrías facilita intervenciones correctivas antes de que se consoliden patrones disfuncionales.

La fatiga excesiva o la negativa frecuente del niño a caminar distancias acordes a su edad puede representar una señal indirecta de disfunción podal. Aunque factores psicosociales también influyen en la tolerancia al esfuerzo, la literatura sugiere que los niños con alteraciones estructurales sintomáticas presentan menor resistencia a la marcha y mayor percepción de cansancio en extremidades inferiores (Pfeiffer et al., 2006). Este síntoma debe analizarse en conjunto con la exploración física y la observación de la marcha, evaluando si existe pronación excesiva, inestabilidad o patrones compensatorios. Cuando la fatiga se asocia a dolor localizado o inflamación recurrente, la consulta especializada resulta imprescindible para descartar procesos inflamatorios crónicos o alteraciones biomecánicas significativas.

Las deformidades progresivas, como el aumento gradual del valgo del retropié o la aparición de prominencias óseas dolorosas, constituyen otra señal de alarma. El hallux valgus juvenil, por ejemplo, puede asociarse con predisposición genética, hiperlaxitud ligamentaria o uso inadecuado de calzado estrecho, y su progresión temprana puede requerir seguimiento especializado (Evans, 2008). La deformidad progresiva implica que los mecanismos de autorregulación estructural no están compensando adecuadamente las cargas, lo que podría desencadenar dolor crónico o limitación funcional futura. La evaluación temprana permite implementar estrategias conservadoras orientadas a modificar factores externos y optimizar la función muscular intrínseca.

La presencia de signos neurológicos asociados, tales como debilidad muscular marcada, alteraciones del equilibrio o retrasos en hitos motores, requiere derivación inmediata a evaluación interdisciplinaria. El pie puede reflejar condiciones neuromusculares más amplias, incluyendo trastornos del tono o alteraciones en la integración sensorial (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Si el niño presenta caídas frecuentes, torpeza significativa o dificultad para mantenerse en apoyo unipodal acorde a su edad, es necesario descartar compromiso neurológico subyacente. El abordaje oportuno mejora el pronóstico funcional y permite diseñar intervenciones personalizadas basadas en la etiología específica.

La inflamación persistente, el enrojecimiento localizado o el aumento de temperatura en el pie son manifestaciones que no deben considerarse normales dentro del proceso de crecimiento. Tales signos pueden indicar procesos infecciosos, inflamatorios o traumáticos que requieren evaluación médica (Rome et al., 2010). En contextos deportivos, microtraumatismos repetitivos pueden generar respuestas inflamatorias acumulativas, cuya persistencia sugiere sobrecarga excesiva o técnica inadecuada. La valoración especializada permite diferenciar entre inflamación transitoria por actividad física y patología estructural subyacente.

La alteración significativa del patrón de marcha, como la marcha en puntas persistente más allá de los tres años o la marcha antálgica, constituye un indicador clínico relevante. Aunque la marcha en puntas puede presentarse transitoriamente en etapas tempranas, su persistencia puede asociarse con acortamiento del tendón de Aquiles o trastornos neuromotores (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). La marcha antálgica, caracterizada por reducción del tiempo de apoyo en el miembro doloroso, es un signo claro de dolor y requiere evaluación inmediata. La observación detallada del ciclo de la marcha proporciona información crítica sobre la funcionalidad del sistema musculoesquelético.

Finalmente, cualquier dolor nocturno persistente, que despierte al niño o se asocie a síntomas sistémicos como fiebre o pérdida de peso, constituye una señal de alarma mayor. Aunque los llamados “dolores de crecimiento” son frecuentes, la evidencia indica que estos no se acompañan de inflamación localizada ni limitación funcional significativa (Evans, 2008). La presencia de síntomas sistémicos obliga a descartar patologías más complejas mediante evaluación médica especializada. La prudencia clínica y la vigilancia activa son fundamentales para diferenciar entre procesos benignos del desarrollo y condiciones que requieren intervención inmediata.

La presencia de alteraciones ungueales recurrentes, como onicocriptosis persistente, infecciones periungueales frecuentes o cambios de coloración inexplicables en las uñas, puede constituir una señal indirecta de alteraciones biomecánicas o del uso inadecuado del calzado durante etapas de crecimiento

acelerado. Si bien estos cuadros suelen considerarse problemas dermatológicos menores, su recurrencia puede reflejar compresiones repetitivas, distribución anómala de cargas o deformidades digitales subyacentes que requieren evaluación especializada (Evans, 2008). La presión constante sobre la lámina ungueal puede modificar la alineación del primer radio y alterar la mecánica de propulsión durante la marcha, generando patrones compensatorios que comprometen la estabilidad global del pie (Neumann, 2017). Además, en población pediátrica activa, la fricción excesiva derivada de calzado inadecuado puede favorecer microtraumatismos repetitivos que perpetúan procesos inflamatorios locales. Por tanto, cuando estas manifestaciones se presentan de forma crónica, dolorosa o bilateral, resulta prudente realizar una valoración integral por parte de un especialista en ortopedia pediátrica o podología clínica, con el fin de descartar alteraciones estructurales o funcionales que excedan el ámbito meramente superficial.

La hiperlaxitud ligamentaria generalizada asociada a inestabilidad marcada del pie representa otra condición que amerita seguimiento especializado, especialmente cuando se acompaña de esguinces recurrentes o sensación subjetiva de “inseguridad” al caminar o correr. Durante la infancia, cierto grado de laxitud es fisiológico; sin embargo, cuando la movilidad articular excede los rangos esperados para la edad y se traduce en colapsos frecuentes del retropié o del mediopié bajo carga, puede existir riesgo incrementado de lesiones por sobreuso (Pfeiffer et al., 2006). La inestabilidad persistente altera la modulación neuromuscular y compromete la eficiencia del sistema propioceptivo, afectando la capacidad del niño para adaptarse a superficies irregulares o cambios rápidos de dirección (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Clínicamente, la evaluación debe incluir pruebas funcionales dinámicas, observación de la marcha y análisis del control postural, pues la hiperlaxitud no tratada puede predisponer a deformidades progresivas. La intervención temprana basada en fortalecimiento específico y educación postural puede modificar el pronóstico, pero su indicación requiere diagnóstico profesional adecuado.

La aparición de callosidades dolorosas o hiperqueratosis localizadas en zonas atípicas del pie infantil constituye una manifestación que no debe considerarse exclusivamente estética, sino potencialmente indicativa de sobrecarga mecánica

focalizada. En condiciones normales, la distribución de presiones plantares en el niño sano es relativamente homogénea y evoluciona conforme madura el arco longitudinal medial; no obstante, la presencia de engrosamientos cutáneos dolorosos puede sugerir alteraciones en el patrón de apoyo o desequilibrios musculares (Rome et al., 2010). Estas adaptaciones cutáneas representan respuestas biológicas a fricciones repetidas y fuerzas compresivas excesivas, que podrían derivarse de pronación marcada, discrepancias en la longitud de miembros inferiores o uso de calzado rígido. Desde una perspectiva biomecánica, la sobrecarga localizada modifica la trayectoria del centro de presión durante la fase de apoyo, generando compensaciones proximales que afectan rodilla y cadera (Neumann, 2017). La evaluación especializada permite identificar la causa primaria de la sobrecarga y establecer estrategias correctivas individualizadas.

Los episodios recurrentes de esguinces de tobillo en población pediátrica activa representan una señal de alerta relevante, especialmente cuando ocurren con mecanismos de baja intensidad o en superficies estables. Aunque la práctica deportiva implica cierto riesgo de lesión, la repetición de esguinces puede indicar déficit propioceptivo, debilidad muscular peronea o alineación inadecuada del retropié (DiFiori et al., 2014). La inestabilidad crónica del tobillo durante la infancia puede interferir con el desarrollo óptimo de patrones motores fundamentales y predisponer a alteraciones estructurales en etapas posteriores. Además, el dolor residual y la inflamación persistente tras episodios aparentemente leves sugieren que el tejido ligamentario no ha recuperado completamente su integridad funcional. La valoración temprana por fisioterapia especializada permite implementar programas de rehabilitación neuromuscular que reduzcan la probabilidad de recurrencia y optimicen la estabilidad dinámica.

La discrepancia aparente en la longitud de miembros inferiores asociada a inclinación pélvica o compensaciones en la marcha debe motivar evaluación clínica detallada, pues puede repercutir directamente en la mecánica del pie. Incluso diferencias leves pueden inducir adaptaciones en la pronación o supinación compensatoria del miembro más largo o más corto, respectivamente (Neumann, 2017). En el niño en crecimiento, estas compensaciones mantenidas pueden alterar la alineación axial y generar sobrecarga unilateral crónica. La

observación de desgaste asimétrico del calzado o inclinación persistente del retropié constituye un hallazgo que amerita estudio. La identificación precoz de discrepancias reales o funcionales permite instaurar intervenciones correctivas antes de que se consoliden patrones estructurales permanentes.

La presencia de dolor durante actividades cotidianas simples, como subir escaleras o permanecer de pie en el entorno escolar, es otro indicador relevante de posible alteración podal significativa. Cuando el dolor limita la participación en actividades habituales o induce evitación sistemática del movimiento, el impacto trasciende el ámbito físico y afecta el bienestar psicosocial del niño (Pfeiffer et al., 2006). La persistencia del dolor más allá de periodos breves de adaptación sugiere desequilibrio entre carga mecánica y capacidad de absorción tisular. Desde una perspectiva clínica integral, es fundamental diferenciar entre molestias transitorias asociadas a crecimiento y síntomas persistentes que indiquen patología estructural o funcional subyacente.

La aparición de deformidades digitales progresivas, como dedos en garra o en martillo durante la infancia, constituye una señal poco frecuente pero clínicamente significativa. Estas alteraciones pueden asociarse con desequilibrios musculares intrínsecos o extrínsecos del pie, uso prolongado de calzado restrictivo o alteraciones neurológicas (Evans, 2008). Su progresión temprana puede comprometer la fase de propulsión durante la marcha y generar dolor metatarsal secundario. La evaluación especializada permite determinar si la deformidad es flexible y susceptible de corrección conservadora o si requiere seguimiento ortopédico más estrecho.

El retraso en la adquisición de habilidades motoras relacionadas con el equilibrio y la coordinación puede manifestarse inicialmente como inestabilidad marcada en el apoyo unipodal o dificultad para correr con patrón maduro. Aunque el desarrollo motor presenta variabilidad individual, la evidencia indica que déficits persistentes en control postural pueden asociarse con alteraciones sensoriomotoras que afectan la estabilidad del pie (Shumway-Cook & Woollacott, 2017). Cuando estas dificultades se acompañan de tropiezos frecuentes o inseguridad manifiesta en superficies irregulares, la valoración

interdisciplinaria resulta esencial para identificar posibles causas neuromusculares.

La historia familiar de deformidades estructurales significativas, como pie plano rígido severo o alteraciones congénitas del tarso, debe considerarse un factor de riesgo que justifica vigilancia clínica periódica. La predisposición genética puede influir en la morfología ósea y en la laxitud ligamentaria, condicionando patrones estructurales que podrían manifestarse progresivamente durante el crecimiento (Mosca, 2010). Aunque la herencia no determina inevitablemente la aparición de patología, su presencia incrementa la probabilidad de alteraciones que requieran intervención especializada.

Finalmente, cualquier cambio brusco en la morfología del pie, aparición súbita de dolor intenso sin antecedente traumático claro o deterioro rápido de la función debe interpretarse como señal de alarma mayor. La evolución repentina sugiere procesos inflamatorios agudos, infecciosos o incluso alteraciones sistémicas que trascienden el ámbito biomecánico local (Rome et al., 2010). La evaluación médica oportuna permite descartar condiciones graves y establecer un plan terapéutico basado en diagnóstico preciso. En el contexto del crecimiento infantil, la vigilancia activa y la consulta temprana ante signos atípicos constituyen estrategias fundamentales para preservar la salud estructural y funcional del pie a largo plazo.





CAPITULO VII

FUTURO Y RECOMENDACIONES



Tendencias contemporáneas en el calzado infantil y deportivo

En el contexto contemporáneo de la ciencia del movimiento humano, el análisis del calzado infantil ha experimentado una transformación paradigmática que trasciende la visión tradicional centrada exclusivamente en la protección mecánica del pie, para incorporar enfoques interdisciplinarios que integran la biomecánica, la neurofisiología, la psicomotricidad y la salud pública, reconociendo que el pie del niño no constituye una estructura pasiva, sino un sistema dinámico en desarrollo cuya interacción con el entorno condiciona profundamente la arquitectura corporal futura; en este sentido, las tendencias actuales en la industria del calzado infantil reflejan una tensión constante entre las demandas del mercado, que promueven diseños estandarizados y estéticamente atractivos, y la evidencia científica que aboga por modelos que respeten la funcionalidad natural del pie, lo que ha dado lugar a un creciente interés por diseños minimalistas que buscan emular la experiencia de la marcha descalza (Robbins & Hanna, 1987; Lieberman et al., 2010).

La evolución hacia el calzado minimalista en la infancia no debe interpretarse como una moda pasajera, sino como una respuesta fundamentada en investigaciones que evidencian que la restricción mecánica impuesta por calzados rígidos altera los patrones de activación muscular y disminuye la estimulación sensorial plantar, afectando procesos clave como la propiocepción, el equilibrio y la coordinación motora; de hecho, estudios longitudinales han demostrado que los niños que crecen con mayor exposición a la marcha descalza desarrollan arcos plantares más funcionales y presentan menor incidencia de deformidades estructurales, lo que sugiere que el calzado debe actuar como una extensión adaptable del pie y no como un molde restrictivo (Hollander et al., 2017).

En esta línea, la literatura científica ha comenzado a cuestionar de manera crítica la introducción temprana de calzado deportivo especializado, particularmente en disciplinas como el fútbol, donde el uso de guayos se ha normalizado desde edades cada vez más tempranas, ignorando que el pie infantil carece de la madurez osteoarticular necesaria para soportar las exigencias mecánicas que estos implementos imponen; la rigidez de la suela, la distribución de los puntos

de presión generados por los taches y la limitación de la movilidad metatarsalángica constituyen factores que pueden interferir en la correcta formación del arco plantar y en la adaptación neuromuscular al terreno (Riddiford-Harland et al., 2018).

Paralelamente, el auge del enfoque ecológico del desarrollo motor ha reforzado la idea de que el aprendizaje del movimiento en la infancia depende en gran medida de la calidad de las interacciones entre el organismo y el entorno, lo que implica que el calzado no debe actuar como un mediador restrictivo, sino como un facilitador de experiencias motrices variadas y enriquecedoras; en este marco, se ha planteado que la sobreprotección del pie mediante estructuras rígidas puede limitar la exploración sensorial y reducir la variabilidad motriz, elementos esenciales para el desarrollo de habilidades complejas (Adolph & Hoch, 2019).

términos de tendencias de mercado, se observa un incremento significativo en la oferta de calzado infantil etiquetado como “ergonómico” o “respetuoso”, aunque no siempre estos productos cumplen con los criterios biomecánicos que la literatura científica establece, lo que plantea la necesidad de fortalecer los procesos de regulación y educación tanto para los padres como para los profesionales de la salud; en efecto, la brecha entre la evidencia científica y la comercialización del calzado infantil continúa siendo un desafío relevante en la promoción de prácticas saludables (Staheli, 2004).

Recomendaciones de pediatras, fisioterapeutas y entrenadores

Desde la perspectiva pediátrica, las recomendaciones actuales enfatizan la importancia de permitir el desarrollo natural del pie durante los primeros años de vida, destacando que la mayoría de las condiciones consideradas “alteraciones” en la infancia, como el pie plano flexible, forman parte de un proceso evolutivo normal que no requiere intervención mediante calzado correctivo, lo que implica un cambio significativo respecto a enfoques tradicionales que promovían el uso de zapatos estructurados desde etapas tempranas; en este sentido, organismos especializados coinciden en que el uso innecesario de soportes rígidos puede interferir en la maduración de las estructuras ligamentarias y musculares del pie (Evans, 2008).

Los fisioterapeutas, por su parte, han aportado evidencia relevante sobre la relación entre el tipo de calzado y la activación neuromuscular, señalando que el uso de calzado restrictivo reduce la participación de los músculos intrínsecos del pie, lo que puede generar debilidad funcional y predisposición a lesiones en etapas posteriores del desarrollo; además, se ha documentado que la disminución de la retroalimentación sensorial plantar afecta la capacidad del sistema nervioso para regular el equilibrio y la postura, especialmente en contextos dinámicos (McKeon et al., 2015).

En el ámbito del entrenamiento deportivo, se ha planteado la necesidad de replantear las prácticas tradicionales que priorizan la especialización temprana y el uso de equipamiento específico sin considerar las características del desarrollo infantil, proponiendo en su lugar enfoques centrados en el juego, la exploración motriz y el fortalecimiento de habilidades básicas, lo que implica retrasar la introducción de calzado deportivo especializado como los guayos hasta etapas en las que el sistema musculoesquelético haya alcanzado un mayor grado de madurez (Lloyd et al., 2015).

Asimismo, los entrenadores desempeñan un papel crucial en la educación de los niños y sus familias respecto al uso adecuado del calzado, ya que sus recomendaciones suelen tener un alto impacto en las decisiones de los padres; por ello, es fundamental que estos profesionales cuenten con formación actualizada basada en evidencia científica, evitando reproducir prácticas tradicionales que pueden resultar perjudiciales para la salud a largo plazo (Myer et al., 2016).

La integración de las perspectivas de pediatras, fisioterapeutas y entrenadores permite construir un enfoque interdisciplinario que reconoce la complejidad del desarrollo infantil y promueve prácticas coherentes orientadas a la prevención, destacando que el bienestar del niño debe prevalecer sobre intereses competitivos o comerciales.

Conclusiones sobre prevención y educación

La prevención de alteraciones en el desarrollo del pie infantil requiere un enfoque integral que considere no solo el tipo de calzado utilizado, sino también las

oportunidades de movimiento, el contexto sociocultural y las prácticas educativas que rodean al niño, reconociendo que la salud del pie es el resultado de múltiples interacciones a lo largo del tiempo y no de un único factor aislado; en este sentido, la educación se posiciona como una herramienta fundamental para promover decisiones informadas que favorezcan el desarrollo saludable (WHO, 2020).

Es necesario desmitificar creencias arraigadas en torno al uso del calzado infantil, particularmente aquellas que asocian la rigidez con la calidad o la corrección de supuestas “alteraciones”, promoviendo en cambio una comprensión basada en la evidencia que valore la funcionalidad y la adaptabilidad como criterios fundamentales en la selección del calzado.

La implementación de programas educativos dirigidos a padres, docentes y entrenadores puede contribuir significativamente a la prevención de problemas musculoesqueléticos, fomentando prácticas como el tiempo descalzo en entornos seguros, la elección de calzado flexible y la promoción de actividades físicas variadas.

En el ámbito institucional, es fundamental que las políticas públicas incorporen lineamientos claros sobre el uso del calzado infantil, especialmente en contextos deportivos y escolares, donde las decisiones suelen estar influenciadas por normas tradicionales más que por evidencia científica.

Finalmente, la construcción de una cultura de prevención en torno al desarrollo del pie infantil implica un compromiso colectivo que involucra a profesionales de la salud, educadores, familias y la industria del calzado, orientado a garantizar que las decisiones adoptadas en la infancia contribuyan al bienestar a lo largo de la vida.

REFERENCIAS

- Adolph, K. E., & Hoch, J. E. (2019). Motor development: Embodied, embedded, enculturated, and enabling. *Annual Review of Psychology, 70*, 141–164. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010418-102836>
- Barela, J. A. (2013). Fundamentos del control postural en el desarrollo infantil. *Revista Paulista de Educação Física, 27*(1), 45–59.
- Baur, H., Müller, S., Hirschmüller, A., Huber, G., & Mayer, F. (2019). Reactivity, stability, and strength performance capacity in barefoot versus shod conditions. *Journal of Strength and Conditioning Research, 33*(4), 1050–1056. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000001993>
- Bishop, C., Arnold, J. B., & May, T. (2016). Effects of footwear on the development of the pediatric foot: A review. *Journal of Foot and Ankle Research, 9*(1), 1–7. <https://doi.org/10.1186/s13047-016-0159-8>
- Bishop, C., Arnold, J. B., & May, T. (2018). Effects of footwear on balance and proprioception in children and adolescents: A systematic review. *Gait & Posture, 62*, 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2018.03.014>
- Bishop, C., Arnold, J. B., May, T., & Burns, J. (2018). Foot posture in children and adolescents: A systematic review. *Journal of Foot and Ankle Research, 11*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13047-018-0288-5>
- Bouchard, M., & Tetreault, P. (2018). Pediatric foot development and biomechanics. *Journal of Pediatric Orthopedics, 38*(6), 321–329.
- Brüggemann, G. P., Potthast, W., Braunstein, B., & Niehoff, A. (2017). Effect of increased mechanical stimuli on foot muscles functional capacity. *Journal of Biomechanics, 50*, 47–52. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2016.11.013>
- Cavagna, G. A., Heglund, N. C., & Taylor, C. R. (1988). Mechanical work in running. *Journal of Experimental Biology, 93*, 1–15.

- Chen, K. C., Tung, L. C., Yeh, C. J., Yang, J. F., Kuo, J. F., & Wang, C. H. (2018). Change in flatfoot of preschool-aged children: A 1-year follow-up study. *European Journal of Pediatrics*, *177*(3), 409–415. <https://doi.org/10.1007/s00431-017-3070-0>
- Clark, J. E., & Metcalfe, J. S. (2002). The mountain of motor development. In J. Clark & J. Humphrey (Eds.), *Motor development: Research and reviews* (Vol. 2, pp. 163–190). NASPE.
- Clark, N. C., Röijezon, U., & Treleaven, J. (2015). Proprioception in musculoskeletal rehabilitation. Part 2: Clinical assessment and intervention. *Manual Therapy*, *20*(3), 378–387. <https://doi.org/10.1016/j.math.2015.01.009>
- D'Aout, K., Pataky, T. C., De Clercq, D., & Aerts, P. (2009). The effects of habitual footwear use: Foot shape and function in native barefoot walkers. *Footwear Science*, *1*(2), 81–94. <https://doi.org/10.1080/19424280903386411>
- DiFiori, J. P., Benjamin, H. J., Brenner, J., Gregory, A., Jayanthi, N., Landry, G. L., & Luke, A. (2014). Overuse injuries and burnout in youth sports: A position statement. *Pediatrics*, *133*(2), 321–327. <https://doi.org/10.1542/peds.2013-3477>
- Engström, P., & Tedroff, K. (2018). Idiopathic toe-walking: Prevalence and natural history from birth to ten years of age. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, *100*(8), 640–647. <https://doi.org/10.2106/JBJS.17.00643>
- Evans, A. M. (2008). The flat-footed child—To treat or not to treat: What is the clinician to do? *Journal of the American Podiatric Medical Association*, *98*(5), 386–393. <https://doi.org/10.7547/0980386>
- Evans, A. M. (2012). The flat-footed child—To treat or not to treat: What is the clinician to do? *Journal of the American Podiatric Medical Association*, *102*(5), 386–393.
- Evans, A. M. (2014). The flat-footed child—To treat or not to treat: What is the clinician to do? *Journal of the American Podiatric Medical Association*, *104*(3), 213–223.

- Evans, A. M. (2018). The flat-footed child—To treat or not to treat: What is the clinician to do? *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 108(2), 96–102. <https://doi.org/10.7547/16-105>
- Evans, A. M., Rome, K., & Peet, L. (2012). The paediatric flat foot proforma (p-FFP): Improved and abridged following a reproducibility study. *Journal of Foot and Ankle Research*, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-5-11>
- Franklin, S., Grey, M. J., Heneghan, N., Bowen, L., & Li, F. X. (2015). Barefoot vs common footwear: A systematic review of the kinematic, kinetic and muscle activity differences during walking. *Gait & Posture*, 42(3), 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2015.05.019>
- Frost, H. M. (1994). Wolff's Law and bone's structural adaptations to mechanical usage: An overview for clinicians. *The Anatomical Record*, 219(1), 1–9. <https://doi.org/10.1002/ar.1092190104>
- Goldblatt, D. (2014). *The game of our lives: The English Premier League and the making of modern Britain*. Penguin.
- Gruber, A. H., & Hamill, J. (2013). Biomechanical and neuromuscular adaptations to barefoot running. *Sports Medicine*, 43(6), 537–552. <https://doi.org/10.1007/s40279-013-0045-0>
- Hall, S. J., & Brody, L. T. (2019). *Therapeutic exercise: Moving toward function* (3rd ed.). Wolters Kluwer.
- Hallems, A., De Clercq, D., & Aerts, P. (2006). Changes in 3D joint dynamics during the first year of independent walking. *Gait & Posture*, 24(3), 270–279.
- Hatton, A. L., Dixon, J., Rome, K., & Martin, D. (2012). Standing on textured surfaces: Effects on standing balance in healthy older adults. *Gait & Posture*, 35(3), 483–486. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.11.023>
- Hollander, K., de Villiers, J. E., Sehner, S., et al. (2017). Growing-up (habitually) barefoot influences the development of foot and arch morphology in children

and adolescents. *Scientific Reports*, 7, 8079.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-07868-4>

Hollander, K., van der Zwaard, B. C., de Villiers, J. E., Braumann, K. M., Venter, R., & Zech, A. (2019). The effects of being habitually barefoot on foot mechanics and motor performance in children. *Frontiers in Pediatrics*, 7, 115. <https://doi.org/10.3389/fped.2019.00115>

Hollander, K., Zech, A., Rahlf, A. L., Orendurff, M. S., Stebbins, J., & Heidt, C. (2019). The relationship between foot posture, muscle strength, and physical performance in children and adolescents: A systematic review. *Gait & Posture*, 73, 238–249. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2019.07.181>

Jenkins, D. W., & Cauthon, D. J. (2011). Barefoot running claims and controversies: A review of the literature. *Journal of the American Podiatric Medical Association*, 101(3), 231–246. <https://doi.org/10.7547/1010231>

Kapandji, I. A. (2019). *Fisiología articular. Tomo II: Miembro inferior* (7.^a ed.). Médica Panamericana.

Kelly, L. A., Cresswell, A. G., & Farris, D. J. (2012). The influence of foot-strike technique on the neuromechanical function of the foot. *Journal of Experimental Biology*, 215(13), 2306–2314. <https://doi.org/10.1242/jeb.064741>

Khamis, S., & Yizhar, Z. (2017). Effect of foot hyperpronation on pelvic alignment in a standing position. *Gait & Posture*, 52, 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.11.039>

Lieberman, D. E. (2012). What we can learn about running from barefoot running: An evolutionary medical perspective. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 40(2), 63–72. <https://doi.org/10.1097/JES.0b013e31824ab210>

Lieberman, D. E., Venkadesan, M., Werbel, W. A., et al. (2010). Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners. *Nature*, 463(7280), 531–535. <https://doi.org/10.1038/nature08723>

- McKeon, P. O., Hertel, J., Bramble, D., & Davis, I. (2015). The foot core system: A new paradigm for understanding intrinsic foot muscle function. *British Journal of Sports Medicine*, 49(5), 290. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2013-092690>
- Micheli, L. J., & Ireland, M. L. (1987). Prevention and management of calcaneal apophysitis in children. *Journal of Pediatric Orthopaedics*, 7(1), 34–38.
- Mickle, K. J., Steele, J. R., & Munro, B. J. (2006). The feet of overweight and obese young children: Are they flat or fat? *Obesity*, 14(11), 1949–1953. <https://doi.org/10.1038/oby.2006.227>
- Mickle, K. J., Steele, J. R., & Munro, B. J. (2008). The feet of overweight and obese young children. *International Journal of Pediatric Obesity*, 3(2), 94–101.
- Mickle, K. J., Steele, J. R., & Munro, B. J. (2019). The feet of overweight and obese young children: Are they flat or fat? *Obesity*, 17(4), 713–717. <https://doi.org/10.1038/oby.2008.591>
- Miller, E. E., Whitcome, K. K., Lieberman, D. E., Norton, H. L., & Dyer, R. E. (2014). The effect of minimal footwear on arch structure and intrinsic foot muscle strength. *Journal of Sport and Health Science*, 3(2), 74–85. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2014.03.011>
- Moore, K. L., Dalley, A. F., & Agur, A. M. R. (2018). *Anatomía con orientación clínica* (8.ª ed.). Wolters Kluwer.
- Morris, D. (2018). *A game of two halves: The history of football boots*. Sports History Publishing.
- Mosca, V. S. (2010). Flexible flatfoot in children and adolescents. *Journal of Children's Orthopaedics*, 4(2), 107–121. <https://doi.org/10.1007/s11832-010-0239-9>
- Müller, S., Carlsohn, A., Müller, J., & Baur, H. (2012). Static and dynamic foot characteristics in children aged 1–13 years: A cross-sectional study. *Gait & Posture*, 35(3), 389–394. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2011.10.357>

- Myer, G. D., Faigenbaum, A. D., Ford, K. R., Best, T. M., Bergeron, M. F., & Hewett, T. E. (2011). When to initiate integrative neuromuscular training to reduce sports-related injuries in youth? *Current Sports Medicine Reports*, 10(3), 155–166. <https://doi.org/10.1249/JSR.0b013e31821b1442>
- Neumann, D. A. (2017). *Kinesiology of the musculoskeletal system: Foundations for rehabilitation* (3rd ed.). Elsevier.
- Newell, K. M. (1986). Constraints on the development of coordination. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control* (pp. 341–360). Martinus Nijhoff.
- Nigg, B. M. (2010). *Biomechanics of sport shoes*. University of Calgary Press.
- Nigg, B. M., Baltich, J., Hoerzer, S., & Enders, H. (2015). Running shoes and running injuries: Mythbusting and a proposal for two new paradigms. *British Journal of Sports Medicine*, 49(20), 1290–1294. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2015-095054>
- Pfeiffer, M., Kotz, R., Ledl, T., Hauser, G., & Sluga, M. (2006). Prevalence of flat foot in preschool-aged children. *Pediatrics*, 118(2), 634–639.
- Pfeiffer, M., Kotz, R., Ledl, T., Hauser, G., & Sluga, M. (2006). Prevalence of flat foot in preschool-aged children. *Pediatrics*, 118(2), 634–639. <https://doi.org/10.1542/peds.2005-2126>
- Powell, M., Seid, M., & Szer, I. S. (2020). Pediatric flexible flatfoot: Clinical aspects and management strategies. *Pediatrics in Review*, 41(2), 57–67. <https://doi.org/10.1542/pir.2018-0236>
- Rao, U. B., & Joseph, B. (1992). The influence of footwear on the prevalence of flat foot: A survey of 2300 children. *Journal of Bone and Joint Surgery (British Volume)*, 74(4), 525–527.
- Rao, U. B., & Joseph, B. (1992). The influence of footwear on the prevalence of flat foot: A survey of 2300 children. *Journal of Bone and Joint Surgery (British Volume)*, 74(4), 525–527.

- Riemann, B. L., & Lephart, S. M. (2002). The sensorimotor system, part I: The physiologic basis of functional joint stability. *Journal of Athletic Training*, 37(1), 71–79.
- Robbins, S. E., & Hanna, A. M. (1987). Running-related injury prevention through barefoot adaptations. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 19(2), 148–156.
- Rome, K., Ashford, R. L., & Evans, A. (2010). Non-surgical interventions for paediatric pes planus. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (7), CD006311. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006311.pub2>
- Rome, K., Ashford, R. L., & Evans, A. (2010). Non-surgical interventions for paediatric pes planus. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (7), CD006311. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006311.pub2>
- Rome, K., Ashford, R. L., & Evans, A. (2017). Non-surgical interventions for paediatric pes planus. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2017(7), CD006311. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD006311.pub3>
- Sacco, I. C. N., Onodera, A. N., Bosch, K., Rosenbaum, D., & Orendurff, M. (2019). Plantar pressure distribution in children with flexible flatfoot: A systematic review. *Clinical Biomechanics*, 68, 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.clinbiomech.2019.06.012>
- Sarrafian, S. K., & Kelikian, A. S. (2011). *Sarrafian's anatomy of the foot and ankle* (3rd ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (2017). *Motor control: Translating research into clinical practice* (5th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
- Smith, A. W., Clarke, T. E., Hamill, C. L., & Santopietro, F. (1986). The effects of soft and hard surfaces on running mechanics. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 18(5), 542–552.
- Staheli, L. T. (1999). Planovalgus foot deformity. *Current Opinion in Pediatrics*, 11(1), 70–75.

- Steffen, K., Andersen, T. E., & Bahr, R. (2011). Risk of injury on artificial turf and natural grass in young female football players. *British Journal of Sports Medicine*, *45*(9), 722–726.
- Thelen, E. (1995). Motor development: A new synthesis. *American Psychologist*, *50*(2), 79–95. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.50.2.79>
- Uden, H., Scharfbillig, R., & Causby, R. (2017). The typically developing paediatric foot: How flat should it be? A systematic review. *Journal of Foot and Ankle Research*, *10*(37), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s13047-017-0218-1>
- Wegener, C., Burns, J., Penkala, S., & Smith, R. (2011). Effect of children's shoes on gait: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Foot and Ankle Research*, *4*(3), 1–9. <https://doi.org/10.1186/1757-1146-4-3>
- Wenger, D. R., Mauldin, D., Morgan, D., Sobol, M. G., & Pennekamp, P. H. (1989). Corrective shoes and inserts as treatment for flexible flatfoot in infants and children. *Journal of Bone and Joint Surgery (American Volume)*, *71*(6), 800–810.
- Wilson, J. (2009). *Inverting the pyramid: The history of soccer tactics*. Orion.
- World Health Organization. (2020). *WHO guidelines on physical activity and sedentary behaviour*. World Health Organization.
- Zech, A., Hübscher, M., Vogt, L., Banzer, W., Hänsel, F., & Pfeifer, K. (2010). Balance training for neuromuscular control and injury prevention: A systematic review. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, *42*(3), 413–421. <https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e3181b88d33>

Fabián Andrés Contreras Jáuregui

Docente de planta, Categoría Asociado. Licenciatura en Educación Física, Recreación y Deportes, Facultad de Ciencias de la Educación de la Universidad del Atlántico, Colombia. Líder - miembro del grupo de Investigación en Educación Física y Ciencias Aplicadas al Deporte GREDFICAD, Fisioterapeuta Universidad Manuela Beltrán, Especialista en Entrenamiento Deportivo Universidad de Pamplona, Doctor en ciencias de la Cultura Física Universidad de Ciencias de la Cultura Física y el Deporte “Manuel Fajardo” La Habana - Cuba, demuestra una amplia experiencia en la docencia universitaria en temáticas como Morfofisiología Deportiva, Biomecánica, Kinesiología, Entrenamiento Deportivo, Técnicas de Evaluación, metodología de la investigación. Su trayectoria investigativa ha sido registrada en publicaciones nacionales e internacionales a través de artículos, libros lo que le ha permitido participar en congresos nacionales e internacionales. fabiancontreras@mail.uniatlantico.edu.co

Ivan David Ortiz Pimienta

docente de planta de la Universidad de Pamplona. Es especialista en Entrenamiento Deportivo y magíster en Ciencias de la Actividad Física, ambos títulos otorgados por la Universidad de Pamplona. Actualmente cursa estudios doctorales en Educación en la Universidad Pedagógica Experimental Libertador

de Venezuela. Se destaca además como investigador Junior reconocido por MinCiencias, consolidando su trayectoria académica, investigativa y formativa en el campo de la educación y las ciencias de la actividad física.

Javit Enrique Luna Manjarres



Docente Universidad del Magdalena. Doctor en Educación de la Universidad Pedagógica Experimental Libertador “UPEL” Venezuela. Cuenta con una Maestría en Educación de la Universidad de Pamplona, Colombia. Además, es Especialista en Ciencias Aplicadas al Entrenamiento Deportivo de la Corporación Universitaria del Caribe “CECAR” Colombia y Licenciado en Educación Básica con Énfasis en Educación Física, Recreación y Deportes de la Universidad de Pamplona, Colombia. Cuenta con amplia experiencia como docente e investigador en el área de la Educación Física y el Entrenamiento Deportivo. Asimismo, su trayectoria académica y profesional se ha centrado en el fortalecimiento de la formación integral y holística de los educandos. Destacando que su trayectoria a nivel investigativo ha sido evidenciada en publicación de artículos a nivel nacional e internacional, capítulos de libro lo que ha permitido apoyar los procesos científicos en su área. jeluna@unimagdalena.edu.co

PARA CITAR EL LIBRO

Contreras Jáuregui, F. A., Ortiz Pimienta, I. D., Luna Manjarres, J. E., & Velastegui Lopez, L. E. (2026). *Pies en crecimiento: fundamentos científicos sobre porque los niños no deberían usar guayos*. Cienciadigital.org. <https://libros.cienciadigital.org/index.php/CienciaDigitalEditorial/catalog/book/54>



Las opiniones expresadas por los autores no reflejan la postura del editor de la obra. El libro es de creación original de los autores, por lo que esta editorial se deslinda de cualquier situación legal derivada por plagios, copias parciales o totales de otras obras ya publicados y la responsabilidad legal recaerá directamente en los autores del libro.


El libro queda en propiedad de la editorial y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la Editorial Ciencia Digital.

CORREOS Y CÓDIGOS ORCID

 Fabián Andrés Contreras Jáuregui


 <https://orcid.org/>

 fabiancontreras@mail.uniatlantico.edu.co

 Ivan David Ortiz Pimienta

 <https://orcid.org/>



 Javit Enrique Luna Manjarres

 <https://orcid.org/>

 jeluna@unimaqdalena.edu.co

 Luis Efraín Velastegui López

 <https://orcid.org/0000-0002-7353-5853>

 velasteguil@ube.edu.ec