

Desarrollo y biomecánica del arco plantar

Christian Álvarez Camarena,* Walterio Palma Villegas**

RESUMEN

El pie humano tiene tres funciones: motora, de equilibrio y amortiguación. Sus 28 huesos y 55 articulaciones forman una bóveda con tres puntos de apoyo y tres arcos, de los cuales el interno es el único visible clínicamente. Los ligamentos son los estabilizadores estáticos de esta estructura y los músculos los estabilizadores dinámicos, cuyo balance, permite el funcionamiento adecuado del pie. En condiciones normales la carga del cuerpo cae entre el 2º y 3º rayo, pero cuando existe hiperlaxitud ligamentaria la carga se desvía hacia el primer rayo o por dentro de él y hace que el pie se deforme en valgo del retropié y pronación del mediopié. Las radiografías simples en proyecciones dorsoplantar y lateral con el paciente de pie permiten hacer una evaluación más objetiva de esta estructura.

Palabras clave: Biomecánica, pie, talo-valgo.

SUMMARY

The human foot has three functions: motor, balance and buffer function. Their 55 joints and its 28 bones form a vault with three support points jointed by three arches, but internal arc is the only one clinically observable. Ligaments are the static stabilizers of this structure, while muscles are the dynamic ones. Perfect balance among them, enables the proper functioning of the foot. Under normal conditions, body burden falls between the 2nd and 3rd beam, but when ligaments hiperlaxity is present, load deviates towards the first beam or inside it, making foot warp in valgus of the hindfoot and pronation of the midfoot. X-rays in dorsoplantar and lateral projections with the patient standing up allow an assessment of this structure.

Key words: Biomechanics, foot, valgus hindfoot.

BIOMECÁNICA DEL PIE

El pie del ser humano, con sus 28 huesos, 55 articulaciones, múltiples ligamentos y músculos, es una estructura perfectamente adaptada para cumplir con las múltiples exigencias de apoyo y locomoción del cuerpo humano, así como para la realización de los movimientos más complejos.

* Médico Ortopedista Pediatra adscrito al Hospital Infantil del Estado de Sonora. Hermosillo, Sonora.

** Médico Ortopedista Pediatra Hospital CIMA Hermosillo. Hermosillo, Sonora.

Dirección para correspondencia:

Dr. Christian Álvarez Camarena

Paseo Río San Miguel 49 Esq. Reforma 3^{er} piso, Módulo C. Col. Proyecto Río Sonora 83280, Hermosillo, Sonora.

Correo electrónico: christianmed19@hotmail.com

Este artículo puede ser consultado en versión completa en <http://www.medigraphic.com/orthotips>

Desde un punto de vista funcional podemos dividir las funciones del pie en:

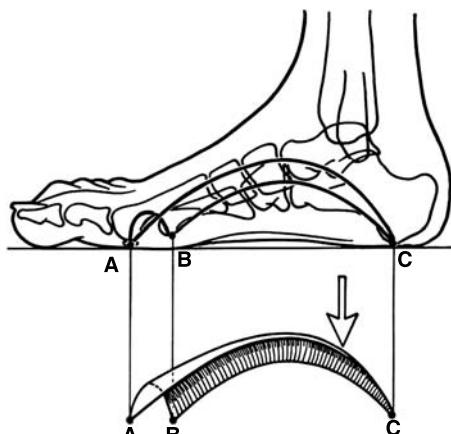
- **Función motora.** Gracias a la cual se logra el impulso necesario para caminar, correr y saltar.
- **Función de equilibrio.** Ésta se lleva a cabo a expensas de la articulación del tobillo, los huesos metatarsianos en el antepié y los ligamentos laterales que actúan a modo de cinchos.
- **Función amortiguadora de las presiones.** Al correr, el pie permanece sobre el suelo 0.25 segundos a 12 km/h, soportando un individuo de 70 kg una media de 110 toneladas durante 1,500 m.^{1,2}

Para fines didácticos, el pie está dividido en tres unidades anatomo-funcionales: **El retropié**, que está constituido por el astrágalo, que se articula con el calcáneo y forma la articulación subastragalina (punto de apoyo posterior). **El mediopié**, integrado por el escafoides, que se articula con la cabeza del astrágalo, el cuboides que se articula con el escafoides y las bases de los metatarsianos. **El antepié**, formado por los cinco metatarsianos y sus respectivas falanges: proximales, medias y distales con las que constituyen los diferentes rayos del antepié.

La disposición de todos sus huesos entre sí forma una bóveda en la parte media del pie que le da una gran resistencia para la carga de peso y el esfuerzo para lo cual se apoya en tres puntos que se conocen como trípode podálico.

Esta bóveda no forma un triángulo equilátero exacto pero se presta a comparación ya que sus puntos de apoyo están comprendidos en la zona de contacto con el suelo formando lo que se denomina impresión o huella plantar. Sus puntos de apoyo son la cabeza del primer metatarsiano, la cabeza del quinto metatarsiano y la apófisis del calcáneo. De estos puntos se desprende la formación de tres arcos, a saber: el arco externo, el arco transverso o anterior y el arco interno o longitudinal, el cual es el más largo y alto, además de ser el más importante de los tres, tanto desde el punto de vista estático como dinámico; además es el único visible clínicamente (*Figura 1*).³

El arco longitudinal o interno comprende cinco huesos que son: el primer metatarsiano, que sólo descansa en el suelo en el punto de apoyo de su cabeza; la primera cuña, que no tiene contacto con el suelo; el escafoides tarsal, al cual se le considera como el hueso cla-



Figuras 1 a 5 tomadas de Kapandji.

Figura 1. La bóveda plantar no forma triángulo equilátero pero posee tres arcos y tres puntos de apoyo.

ve en la formación de la bóveda plantar y que en la edad adulta promedia una elevación de 15 a 18 mm por encima del suelo; el astrágalo, que es el que se encarga de distribuir a través de la bóveda los impulsos provenientes de la pierna; y por último, el calcáneo, que descansa sobre el suelo por su extremo posterior.

El arco externo incluye a tres huesos: el quinto metatarsiano, sobre cuya cabeza descansa el apoyo anterior; el cuboides, que se encuentra en suspensión y sin contacto con el suelo, y el calcáneo cuyas tuberosidades posteriores constituyen el punto de apoyo posterior. Este arco es mucho más rígido que el arco interno, lo que le permite transmitir adecuadamente el impulso motor del tríceps sural, potenciado en su mayor parte por el gran ligamento calcáneo-cuboideo plantar, cuyos fascículos profundo y superficial impiden que las articulaciones calcáneo-cuboidea y cuboideo-metatarsiana se entreabran por su parte inferior bajo la influencia del peso del cuerpo.

El arco anterior o transverso tiene como puntos de apoyo las cabezas del primer y quinto metatarsiano, con lo cual las cabezas de los otros tres metatarsianos normalmente no tienen contacto con el suelo. Sin embargo,

en muchas patologías en las que existe un desbalance entre los músculos intrínsecos del pie, se ocasiona el aplanamiento de este arco, lo que contribuye a la formación de los dedos en garra y a la aparición de callosidades plantares de dolor variable (*Figura 2*).

La transmisión de los impulsos mecánicos se puede leer por la disposición de las trabéculas óseas donde las trabéculas que nacen de la cortical anterior de la tibia recorren oblicuamente hacia abajo y atrás para diseminarse en el abanico subtalámico en dirección al estribo posterior del arco, mientras que aquellas que se originan de la cortical posterior de la tibia se orientan hacia abajo y hacia adelante en el cuello y cabeza del astrágalo para atravesar el escafoideas, la cuña y el primer metatarsiano (*Figura 3*).^{2,3}

El arco interno conserva su concavidad gracias a los ligamentos y a los músculos que actúan como tensores, principalmente el tibial posterior, el peroneo lateral largo, el flexor del primer dedo y el aductor del mismo. Por el contrario, el extensor propio del primer dedo así como el tibial anterior tienden a aplanarlo.

La distribución de la carga sobre los tres puntos de apoyo del pie no es uniforme; se considera que en posición erguida, vertical e inmóvil, el peso se distribuye en un 50% hacia el calcáneo y el otro 50% se divide: un tercio sobre el apoyo anteroex-

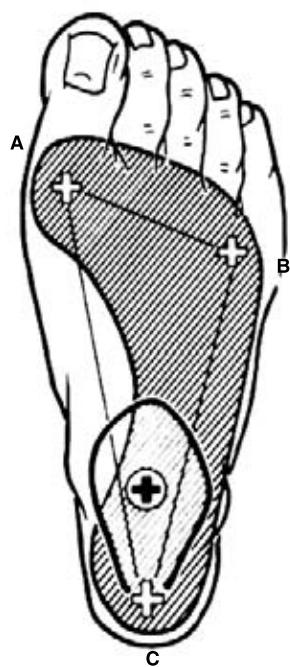


Figura 2. El pie visto desde arriba comprendiendo sus tres puntos de apoyo y la zona sombreada que corresponde a la zona de contacto con el suelo o impresión plantar.

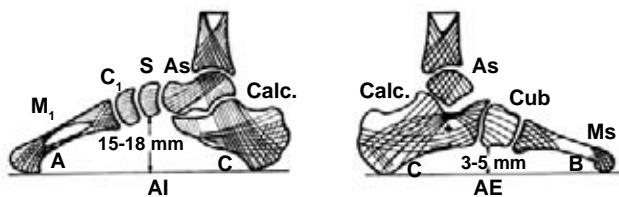


Figura 3. La transmisión de los impulsos mecánicos se lee en la disposición de las trabéculas óseas. A) Arco interno. AE) Arco externo.

terno y los dos tercios restantes sobre el apoyo anterointerno (*Figura 4*).

Los arcos sufren modificaciones por el efecto de la carga, principalmente el arco longitudinal, el cual puede descender tanto por laxitud de los ligamentos como por falta de tensión muscular, lo que ocasiona un desplazamiento de la cabeza del astrágalo hacia adentro, el eje del pie posterior se desvía hacia adentro, mientras que el eje del pie anterior lo hace hacia afuera, el pie posterior gira en aducción-pronación y ligera extensión mientras que el pie anterior efectúa una desviación en flexión-abducción-supinación, lo que genera el pie plano valgo elástico de la infancia (*Figura 5*).^{3,4} En el arco externo también se producen desplazamientos verticales del calcáneo; el cuboides, por su parte, desciende junto con la estiloides del quinto metatarsiano con un retroceso del talón y avance de la cabeza del quinto metatarsiano. El arco anterior o transverso se aplasta y se extiende a cada lado del segundo metatarsiano. La distancia entre los metatarsianos aumenta significativamente, de modo que esta distancia se ensancha aproximadamente 12 mm en el pie adulto bajo carga.

Los ligamentos articulares son los elementos estáticos del pie que mantienen unidos los distintos huesos entre sí para darle soporte a los arcos. La estabilidad estática la dan los ligamentos, mientras que la estabilidad dinámica es generada por los músculos, que proporcionan resistencia y movimiento. Si se mantienen en equilibrio las fuerzas evertoras con las invertoras, el pie conserva un buen balance y por tanto la altura fisiológica de sus arcos.

Además de la marcha, el pie tiene entre otras funciones: sujetarse al terreno, patear, trotar, soportar peso, empujar, correr, saltar, sentir, etcétera.^{5,6}

DESARROLLO DEL PIE

La evolución normal del arco longitudinal interno comienza desde el nacimiento. La posición más común del pie es con calcáneo-valgo, sin presencia del arco



Figura 4. La transmisión del peso se hace por medio de la articulación tibio-tarsiana desde donde se distribuye hacia los 3 puntos de apoyo identificados con la cruz en negro.

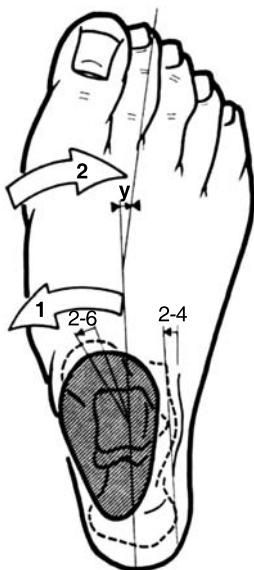


Figura 5. Desviación de los ejes en el individuo con pie plano valgo. Flecha 1. El pie posterior gira en aducción y pronación. Flecha 2. El pie anterior gira en flexión, abducción y supinación.



Figura 6. Apariencia típica del pie de un niño de 18 meses mostrando la caída de arco longitudinal interno.

longitudinal interno. Cuando el niño empieza a caminar alrededor de los 12 a los 18 meses, en la región medial del pie no hay presencia de arco y se encuentra una capa de tejido adiposo que cubre esta zona (*Figura 6*). El arco longitudinal interno inicia su formación entre los 2 y 3 años de edad, y después del inicio de la marcha se hace una distribución del tejido adiposo plantar.⁷⁻¹¹

La formación del arco longitudinal depende de la integridad de los huesos y articulaciones tarsianas, así como de la potencia de los ligamentos que los unen. El arco longitudinal del pie no depende de la contracción activa de los músculos. Los estudios electromiográficos han demostrado actividad eléctrica mínima o nula en los músculos intrínsecos y extrínsecos del pie y la pierna en la persona que está de pie y en reposo. Las funciones principales de los músculos primarios de la extremidad pélvica incluyen conservar el equilibrio, impulsar el pie hacia adelante y proteger los ligamentos de grandes cargas anormales, como las que se pueden presentar al caminar en un terreno áspero.^{3,12,13}

Cuando el pie hipomóvil recibe cargas, además de las fuerzas estáticas del cuerpo (peso), el calcáneo se prona debajo del astrágalo, desplazando su extremo anterior hacia afuera y en sentido dorsal, en tanto que la cabeza del astrágalo lo hace hacia adentro y en sentido plantar, ya que el ligamento calcáneo-escafoideo inferior (ligamento mayor de la planta) se distiende debido a la hiperlaxitud ligamentosa, y no sostiene la cabeza del astrágalo, mientras que el ligamento interóseo astrágalo-calcáneo, completamente laxo, permite la eversión del talón. En la articulación astrágalo-escafoidea se produce un movimiento horizontal y el escafoideas entra en abducción con relación a la cabeza del astrágalo y se desplaza en bloque junto con el extremo anterior del calcáneo. El antepié es arrastrado por el escafoideas y el centro de gravedad del cuerpo se desplaza sobre el primer metatarsiano o por dentro de él. En circunstancias normales, el peso corporal se descarga entre el segundo y tercer rayo (*Figura 7*).

El pie que durante la bipedestación asume una postura en valgo por la hipperlaxitud ligamentaria, con el desplazamiento interno de la carga estática del cuerpo está sometido a cargas excesivas. No es el aplanamiento del arco longitudinal sino el desplazamiento de la carga hacia adentro lo que hace que un pie pronado sea mecánicamente débil. Para compensar esta falla mecánica, la naturaleza hace que el niño, durante la marcha, apoye con el antepié en intraversión, de tal manera que el centro de gravedad del cuerpo se desplaza de afuera, hacia el centro del pie, colocando el antepié en aducción.

En la literatura se ha producido controversia en cuanto a si la supinación y la aducción activas del antepié forman parte de la deformidad compleja del pie plano valgo flexible. Se ha propuesto que la intraversión del antepié durante la marcha, con supinación de los rayos mediales en la posición de apoyo bipodálico durante la marcha, son mecanismos compensatorios y no constituyen la deformidad primaria.^{14,15}

RADIOLOGÍA DEL PIE

El estudio radiográfico de los pies mostrará la alineación defectuosa de las articulaciones y el sitio anatómico de la solución de continuidad en el arco longitudinal, sea en la articulación astragaloescapoidea, astragalocuneal o en ambas. Las radiografías deben hacerse con el niño de pie y sus músculos relajados. Si los pies muestran flexibilidad clínicamente, por lo común no se necesitan radiografías sin bipedestación.

En la proyección lateral con el pie normal en bipedestación, las líneas trazadas por el centro de los ejes longitudinales del astrágalo, escafoideas, primera cuña y primer metatarsiano forman una línea recta. Se traza una línea vertical por el centro del escafoideas que sea paralela a su carilla articular proximal. En un pie normal, el eje longitudinal del astrágalo interseca la línea vertical del escafoideas en ángulo recto (*Figura 8 A*).^{15,16}



Figuras tomadas de Tachdjian.

Figura 7. A. Durante el apoyo bipodálico, el centro de gravedad recae sobre el primer metatarsiano o por dentro de él. **B.** Durante la marcha, se gira hacia adentro el antepié para desplazar el peso corporal hacia afuera.

Cuando hay solución de continuidad a nivel de la articulación astrágalo-escafoidea, el eje longitudinal del astrágalo se orienta en sentido plantar y sale sobre el cuarto inferior del mismo hueso por detrás de la primera cuña (*Figura 8 B*). En el pie plano flexible por colapso escafocuneal el eje longitudinal del astrágalo y el escafoides forman una línea recta y biseca la línea vertical del escafoides, en ángulo recto, pero sale en la porción plantar de la primera cuña en sentido proximal a la base del primer metatarsiano (*Figura 8 C*). En el pie plano flexible por colapso de las articulaciones astragaloescapoidea y escafoidocuneal la línea trazada por el eje longitudinal del escafoides, cuando se extiende en sentido proximal y distal, queda en sentido plantar al centro de los segmentos astragalino y del primer metatarsiano (*Figura 8 D*).

El astrágalo, además de mostrar flexión plantar se desvía hacia adentro. En la radiografía anteroposterior con la desviación medial del astrágalo y el giro lateral o externo anterior del calcáneo se ensancha el ángulo astragalocalcáneo anteroposterior y por lo común excede de 35° (*Figura 9*).

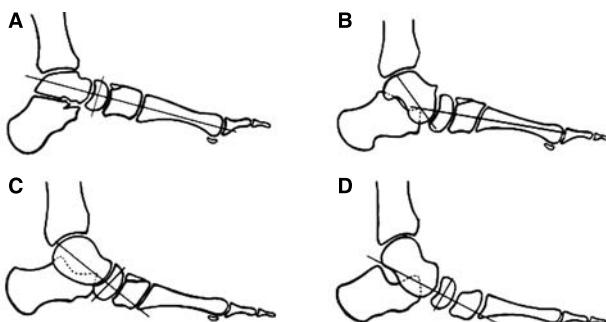


Figura 8. A) Pie normal,
B) Pie plano flexible por colapso astragaloescapoideo,
C) Pie plano flexible por colapso escafoidocuneal,
D) Pie plano flexible por colapso en las articulaciones astragaloescapoidea y escafoidocuneal.

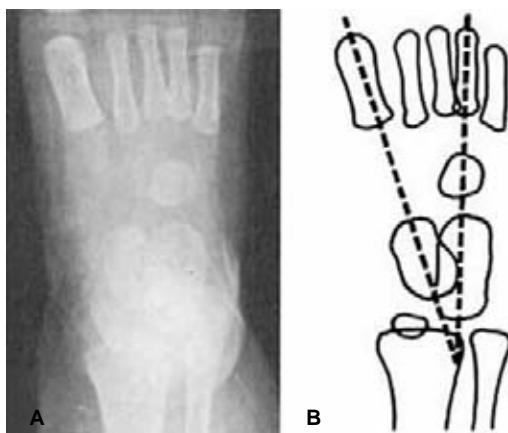


Figura 9. El ángulo entre el astrágalo y el calcáneo varía con la edad. En lactantes y niños pequeños el ángulo mide de 30 a 50 grados y en los niños mayores de 5 años el ángulo mide de 15 a 30 grados.

BIBLIOGRAFÍA

1. Mansat C, Huertas C. *El pie Anatomía y Biomecánica*. L'Observatoire du Mouvement 2003; (1): 1-5.
2. Lelievre J, Lelievre JF. La cúpula plantar. En: *Patología del Pie*. 4^a Ed Toray-Masson, Barcelona, 1982: 35-51.
3. Kapandji IA. *Cuaderno de Fisiología articular*. 3^{era} Ed. Toray- Masson, Barcelona, 1980: 196-213.
4. Mosca V. Flexible flatfoot in children and adolescents. *J Child Orthop* 2010; (4): 107-121.
5. Morrissey RT, Weinstein SL. *Lovell & Winter's Pediatric Orthopaedics*. 6th Ed Lippincott Williams & Wilkins, 2006: 1260-1262.
6. Mickle KJ, Steele JR, Munro BJ. Is the foot structure of preschool children moderated by gender? *J Pediatr Orthop* 2008; 28(5): 593-596.
7. Cheng JC, Chan PS, Hui PW. Joint laxity in children. *J Pediatr Orthop* 1991; 11(6): 752-6.
8. Rose GK, Welton CA, Marshall T. The diagnosis of flat foot in the child. *J Bone Joint Surg* 1986; 67B: 71-8.
9. Staheli L. *El Pie*. En: Staheli Ortopedia Pediátrica. 1^{era} Edición Madrid: Marban. 2003: 89-113.
10. Hennig EM, Rosenbaum D. Pressure distribution patterns under the feet of children in comparison with adults. *Foot Ankle* 1991; 11(5): 306-311.
11. Volpon JB. Footprint analysis during the growth period. *J Pediatr Orthop* 1994; 14: 83-85.
12. Hernandez A, Kimura L, Ferreira Laraya M, Fávaro E. Calculation of Staheli's plantar arch index and prevalence of flat feet: a study with 100 children aged 5-9 years. *Acta Ortop Bras* 2007; 15(2): 68-71.
13. Wenger D. *Flatfoot and children's shoes*. En: Ther art and practice of children's orthopaedics. Raven Press: New York. 1993: 77-102.
14. Tachdjian M. *Ortopedia Pediátrica*. 2^a Ed. Interamericana-McGraw-Hill. 1990: 2927-2933.
15. Mosca V. *Flexible flat foot and skewfoot*. En: Drennan James The Child's foot and ankle. Raven Press New York 1992. 355-376.
16. Mosca V. Flexible flat foot and skewfoot. En: Drennan James The Child's foot and ankle. Raven Press New York 1992. 37-69.