

BIOMECÁNICA DEL TOBILLO Y DE LA SUBASTRAGALINA

A. Viladot Voegeli

Clínica Tres Torres. Barcelona

2

Introducción

En el presente capítulo de “Biomecánica del tobillo y de la subastragalina” analizaremos 3 aspectos que consideramos básicos para la comprensión de la patología y la orientación terapéutica de la región:

1. La cinemática.
2. Los mecanismos de estabilización articular.
3. La interrelación funcional entre tobillo y subastragalina.

Cinemática del tobillo

El principal movimiento del tobillo es el de flexoextensión. El eje de este movimiento pasa ligeramente por debajo de las puntas de los maléolos y se dirige de arriba abajo, de dentro afuera y de delante hacia detrás. El ángulo que forma con el plano horizontal es de 8°, con el sagital de 20° y con el frontal de 6°, aproximadamente.

El arco de movimiento va, con el pie en descarga, desde los 20° de flexión dorsal hasta los 45° de flexión plantar. Durante la marcha, el arco que utilizamos es inferior⁽¹⁾: 10° de dorsiflexión y 15° de flexión plantar, mientras que para las escaleras necesitamos un arco mayor: 37° para subirlas y 56° para bajarlas.

En el tobillo patológico el primer movimiento que se ve afectado es el de la flexoextensión, lo cual comporta una cojera durante la marcha, con disminución de la longitud del paso y una dificultad para subir y bajar las escaleras. Ello es debido a que, para que se produzca una flexoextensión normal, son necesarios unos



<https://doi.org/10.24129/j.mact.1401.fs2205002>

© 2022 SEMCPT. Publicado por Imaidea Interactiva en FONDOSCIENCE® (www.fondoscience.com).

Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (www.creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

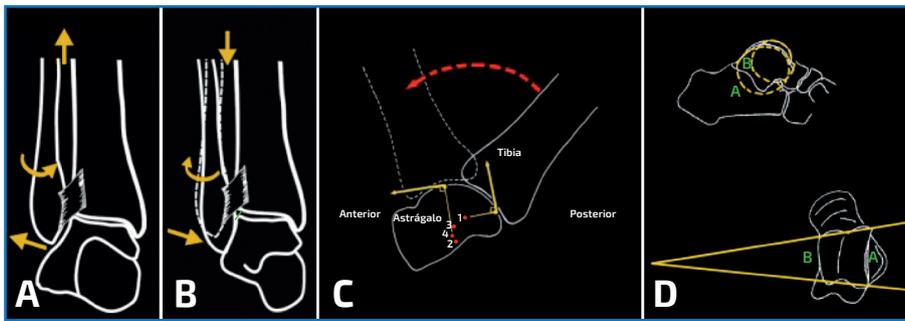


Figura 1. A: movimientos de la sindesmosis en flexión dorsal: el peroné asciende, se separa de la tibia y rota externamente. B: movimientos de la sindesmosis en flexión plantar: el peroné desciende, se acerca a la tibia y rota internamente. C: situación de los centros de rotación en el astrágalo: en 4 se produce el deslizamiento. D: la tróclea astragalina tiene forma troncocónica. El radio de curvatura de la externa (A) es mayor que la interna (B), lo cual condiciona la rotación del pie en el plano horizontal. Nótese la posición posterior del peroné y la rotación externa (flecha roja).

movimientos simultáneos en la sindesmosis: recordemos que la tróclea astragalina es de 4 a 6 mm más ancha por delante que por detrás. Ello hace que en flexión dorsal la pinza maleolar deba abrirse a nivel de la sindesmosis para dar cabida a la parte anterior, más ancha, del astrágalo. Para ello, el peroné asciende, se separa y rota externamente (Figura 1A). En la flexión plantar ocurre lo contrario: la pinza maleolar se cierra, el peroné desciende y rota internamente acercándose a la tibia (Figura 1B). Cuando existe una alteración en la morfología de la pinza maleolar o una lesión de los ligamentos de la sindesmosis, estos movimientos de adaptación pinza-tróclea se ven alterados, con la consiguiente disminución de la flexoextensión.

La flexoextensión del tobillo no es un movimiento puro, como el de una bisagra, sino que va acompañado de un movimiento de deslizamiento en el plano sagital y uno de rotación en el plano horizontal.

El movimiento de deslizamiento se explica porque, tal como ha demostrado Sanmarco⁽²⁾, la flexoextensión tiene lugar alrededor de múltiples centros instantáneos de rotación situados todos ellos en el interior del astrágalo (Figura 1C). Se constituye un sistema de 4 barras, similar al existente en la rodilla, en el que se combina rotación y deslizamiento en la superficie articular. Cuando el tobillo se encuentra en flexión plantar, hay una distracción de la articulación, en posición intermedia tiene lugar el deslizamiento y, al final de

la dorsiflexión, hay una compresión articular.

La rotación en el plano horizontal es debida a que la tróclea astragalina no es cilíndrica, sino que tiene una forma de tronco de cono⁽³⁾, con el vértice en el maléolo tibial, siendo el radio de curvatura de la tróclea externa mayor que el de la interna (Figura 1D). El conjunto condiciona que el astrágalo –y con él el pie– realice una pequeña rotación interna de 1° en la flexión plantar y una rotación externa de 9° en la flexión dorsal⁽⁴⁾.

Además de los movimientos descritos, el astrágalo realiza también en el plano frontal unos movimientos de pronosupinación dentro de la mortaja tibioperonea, sobre todo en flexión plantar.

Cinemática de la subastragalina

La articulación subastragalina realiza 2 movimientos complejos, compuestos a su vez de movimientos más simples, que son ampliados por la articulación de Chopart: estos movimientos son la inversión y la eversión del pie, y se realizan en torno al eje de Henke, que penetra por la cara superointerna del cuello del astrágalo, pasa a través del seno del tarso y sale por la parte posteroexterna del calcáneo. Forma un ángulo de 16° con el plano longitudinal y de 42° con el transverso⁽⁵⁾. En la inversión, con el astrágalo fijo en la mortaja y el pie en descarga, el calcáneo realiza 4 movimientos:

- a) Descenso de la porción anterior, en flexión, colocándose en equino.
- b) Desplazamiento hacia dentro en aducción, colocándose en *varus*.
- c) Gira hacia dentro, haciendo que su cara plantar mire hacia dentro, colocándose en supinación. Farabeuf ha hecho la clásica comparación de estos movimientos con los de un barco, diciendo que el “calcáneo cabecea, vira y oscila bajo el astrágalo”.

d) Movimiento de deslizamiento o listesis hacia atrás del calcáneo, de forma que la extremidad anterior del mismo queda en una situación más posterior a la del astrágalo.

Este movimiento fue descrito por primera vez por A. Viladot *et al.*⁽⁶⁾ en 1975 y, posteriormente, ampliado por nosotros⁽⁷⁾, basándonos en estudios cineradiológicos. Es muy evidente en el pie infantil, exagerado en los pies laxos, va disminuyendo en el adulto, para desaparecer precozmente tanto en las artrosis como en las artritis de esta articulación.

Este conjunto de movimientos “uniplanares” –flexión, aducción, supinación y listesis– constituyen el movimiento “triplanar complejo” de inversión del pie, que alcanza los 30°.

En la eversión, que alcanza los 10°, los movimientos se hacen en sentido contrario, de manera que el calcáneo se coloca en talo, en valgo, en pronación y hacia delante respecto al astrágalo.

Como hemos comentado con anterioridad, todos estos movimientos de la subastragalina son ampliados al nivel de la articulación de Chopart.

Debemos hacer 2 importantes observaciones:

a) Estos movimientos siempre se realizan conjuntamente. No hay posibilidad de flexoextensión de la subastragalina si al mismo tiempo no se realizan todos los demás movimientos. Por ello, en la anquilosis del tobillo, en la que se fuerza la flexión plantar de la subastragalina, el pie tiene tendencia a deformarse en *varus*.

b) Calcáneo, escafoides y cuboides permanecen solidarios. Existe un movimiento conjunto de todos estos huesos en torno al astrágalo. Por esto, en las luxaciones traumáticas de la subastragalina existe un desplazamiento total del pie, por debajo y por delante del astrágalo. En el pie zambo, las mismas formaciones realizan un movimiento de inversión, haciéndose paralelos los ejes del astrágalo y el calcáneo. A la inversa, en el pie plano, aumenta la divergencia de los mismos ejes.

Estabilización del tobillo

La estabilidad del tobillo viene asegurada de forma pasiva por su arquitectura ósea y por el complejo sistema ligamentoso que tiene esta articulación. Los músculos participan también de forma activa en la estabilización.

Arquitectura ósea

La geometría articular del tobillo confiere a este una gran estabilidad, siendo la articulación más congruente de la extremidad inferior, lo cual explica lo poco frecuente que es la aparición de una artrosis primaria a este nivel. La estabilidad es debida a que la superficie articular de la tróclea es de 105° y está cubierta en más de la mitad por la superficie articular de la tibia, que es de 65°. Por otra parte, los maléolos peroneo y tibial se adaptan perfectamente a las carillas laterales del astrágalo en todo el arco de movimiento⁽³⁾ y el tercer maléolo controla el desplazamiento posterior. El conjunto hace que la articulación sea muy congruente y, por tanto, muy estable en cualquier posición. Se ha demostrado⁽⁸⁾ que, con el tobillo en carga, la arquitectura ósea estabiliza el 100% de los movimientos de inversión-eversión y el 30% de las rotaciones.

Este mecanismo de estabilización es complementado por los ligamentos.

Sistema ligamentoso

Distinguimos dentro de este sistema ligamentoso 3 grupos fundamentales:

- Complejo ligamentoso medial.
- Complejo ligamentoso lateral.
- Ligamentos que unen las epífisis distales de tibia y peroné.

El complejo ligamentoso medial está constituido por las capas superficial y profunda del ligamento deltoideo. La capa superficial estabiliza tanto el tobillo como la subastragalina, controlando el valgo. La capa profunda (tibioastragalina) obliga al astrágalo a rotar internamente en la flexión plantar y, por el contrario, limita la rotación externa en la flexión dorsal. Además, controla el cajón anterior del astrágalo dentro de la mortaja (**Figura 2B**).

Los fascículos del ligamento lateral presentan una disposición anatómica que les permite controlar la inversión del pie en diferentes posiciones del tobillo. Tal como ha demostrado Inmann⁽³⁾, los ligamentos peroneo astragalino anterior y peroneo calcáneo forman un ángulo entre sí de 120° (**Figura 2A**). Cuando el tobillo se mueve en flexión plantar, el ligamento peroneo astragalino anterior se tensa progresivamente, limitando la

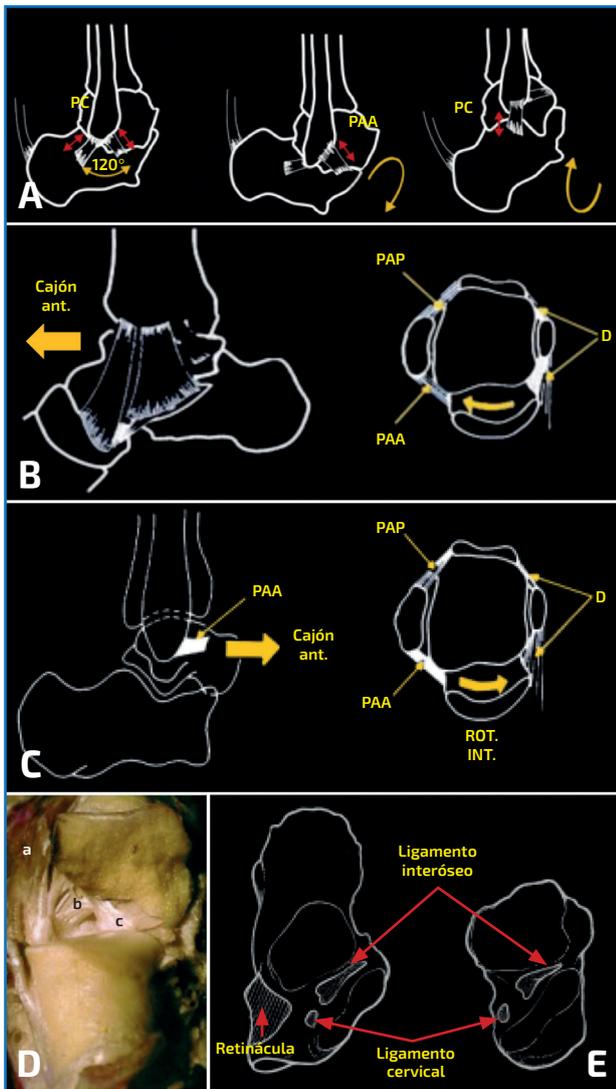


Figura 2. A: control de la inversión por el peroneo astragalino anterior (PAA) y peroneo calcáneo (PC) en flexión neutra, flexión plantar y flexión dorsal; B: el ligamento deltoideo controla la pronación, el cajón anterior y la rotación externa; C: el PAA controla la supinación, el cajón anterior y la rotación interna; D: ligamentos del seno y canal del tarso vistos en el plano frontal –a: retináculo, b: ligamento cervical, c: ligamento interóseo–; E: áreas de inserción de los ligamentos del seno y canal del tarso en calcáneo y astrágalo.

inversión y el desplazamiento del astrágalo hacia delante. Con el tobillo en posición neutra, tanto el peroneo astragalino anterior como el peroneo calcáneo limitan la inversión del pie y el peroneo astragalino anterior limita también el cajón anterior del astrágalo dentro de la mortaja (**Figura 2C**).

Existe un porcentaje de la población que constitucionalmente presenta un ángulo superior entre ambos ligamentos, con la consiguiente dificultad para controlar la inversión del pie, siendo una causa de inestabilidad crónica de tobillo.

Cuando el tobillo se mueve en flexión dorsal, el peroneo astragalino anterior deja de controlar la inversión del pie, siendo en esta posición el peroneo calcáneo el que realiza esta función.

El ligamento peroneo astragalino posterior limita en los últimos grados la flexión dorsal del tobillo. Cuando el ligamento peroneo astragalino anterior se encuentra lesionado, ayuda a controlar la rotación interna y, cuando el ligamento lesionado es el peroneo calcáneo, ayuda a controlar la inversión y la flexión dorsal.

Los ligamentos de la sindesmosis tienen como función, tal como hemos indicado, controlar la apertura y cierre de la mortaja tibioperonea a lo largo de los movimientos de flexoextensión estabilizando el astrágalo.

Como podemos ver, en todo el arco de movimiento de flexoextensor existe una correcta tensión ligamentosa que permite estabilizar el astrágalo dentro de la mortaja. Esto constituye lo que Neer denomina “sistema de aprensión elástico del astrágalo”. Cuando existe una lesión ligamentosa, el sistema se rompe, dando lugar a una inestabilidad que puede conducir a la artrosis por los microtraumatismos repetidos.

Sistema muscular

El músculo tibial posterior es el responsable de controlar de forma activa la eversión y abducción del pie, protegiendo por tanto el ligamento deltoideo. La musculatura peronea ejerce la función contraria: controla la inversión, por lo que es la principal protectora del complejo ligamentoso externo. Los músculos de la pierna y la membrana interósea ayudan a controlar la apertura y cierre de la sindesmosis.

Estabilización de la subastragalina

A nivel de la subastragalina también encontramos una estabilización pasiva, que corre a cargo de la morfología ósea y de los ligamentos, y una activa, que se debe a la acción muscular.

Arquitectura ósea

La subastragalina se halla formada por 2 articulaciones: una posteroexterna y otra anterointerna. Ambas tienen una sección irregularmente esférica, pero con la particularidad de que en la posterior la parte convexa se encuentra en la carilla inferior (calcánea), mientras que en la anterior se encuentra en la superior (astragalina). Esta particularidad hace que la subastragalina sea una artrodia, siendo muy difícil, desde el punto de vista geométrico, que se deslicen a la vez una encima de otra sin que aparezca una cierta incongruencia en alguna de ellas. Son francamente concordantes en posición intermedia, pero discordantes en posición extrema.

Sistema ligamentoso

Además de la cápsula articular, ambas subastragalinas se hallan unidas por una serie de formaciones ligamentosas.

En la parte más externa encontramos el fascículo peroneo calcáneo del ligamento lateral del tobillo y los ligamentos astragalocalcáneos anterior y posterior que contribuyen a estabilizar el varo-inversión del retropié.

Más medialmente, en el seno del tarso propiamente dicho (**Figuras 2D y 2E**), se encuentran unas fibras muy laxas, la retináculo, procedentes de expansiones de la aponeurosis del pedio y del ligamento anular. Esta estructura no participa directamente en la estabilidad de la subastragalina pero, dada su rica inervación, desempeña un importante papel en la sensibilidad propioceptiva de la zona.

También en el seno del tarso, medial a la retináculo, hallamos el ligamento cervical, que también contribuye al control de la inversión del pie. Esta función mecánica es de poca relevancia, ya que en su estructura se mezclan fibras colágenas de poca entidad y fibras elásticas.

En la parte interna de la subastragalina, ya en el canal del tarso, se encuentra el potente ligamento interóseo, formado por gran cantidad de fibras colágenas, siendo el principal responsable de la estabilidad de esta articulación. Consta de 2 fascículos: un fascículo posterior de dirección más o menos transversa y que refuerza por delante la cápsula de la subastragalina posterior, y un fas-

cículo anterior, de dirección más sagital, colocado en la profundidad del seno del tarso, más cercano a la subastragalina anterior. En el vértice del ángulo que forman estos 2 ligamentos, De Doncker y Kowalski⁽⁹⁾ han descrito un potente refuerzo situado en la parte más profunda del canal del tarso, en el vértice del triángulo formado por la subastragalina posterior y que constituiría el eje sobre el cual gira la articulación. El movimiento del astrágalo sobre el calcáneo lo comparan estos autores con el giro de un limpiaparabrisas, siendo el centro de giro el refuerzo ligamentoso mencionado. Riaza⁽¹⁰⁾ y Miralles⁽¹¹⁾ equipararon la misión de los 2 fascículos del ligamento interóseo a la de los ligamentos cruzados de la rodilla, enrollándose y entrecruzándose en las diferentes posiciones del pie, manteniendo estable la articulación subastragalina: el movimiento de inversión y listesis anterior será frenado por el fascículo anterior del ligamento interóseo y el movimiento de eversión y listesis posterior, por el posterior.

Por último, en la parte más medial de la articulación, encontramos la capa superficial del ligamento deltoideo que, como ya hemos dicho, contribuye a controlar el movimiento de eversión.

Sistema muscular

Al igual que en el tobillo, la musculatura peronea controla la inversión y la musculatura tibial controla la eversión subtalar.

Interrelación funcional entre tobillo y subastragalina

Tal como ha descrito Inmann, las articulaciones del tobillo, subastragalina y Chopart trabajan de forma conjunta. Se puede comparar la articulación subastragalina con una bisagra que conecta un elemento vertical (la pierna) con uno longitudinal (el pie). La rotación interna de la pierna se acompaña de una eversión del pie y la rotación externa de una inversión.

Durante la marcha (**Figura 3A**), en el momento de contacto del talón con el suelo, la tibia realiza un movimiento de rotación interna, el tobillo realiza una flexión plantar y el retropié se coloca en valgo. En esta posición, los ejes en el plano frontal de la articulación astragaloescafoidea

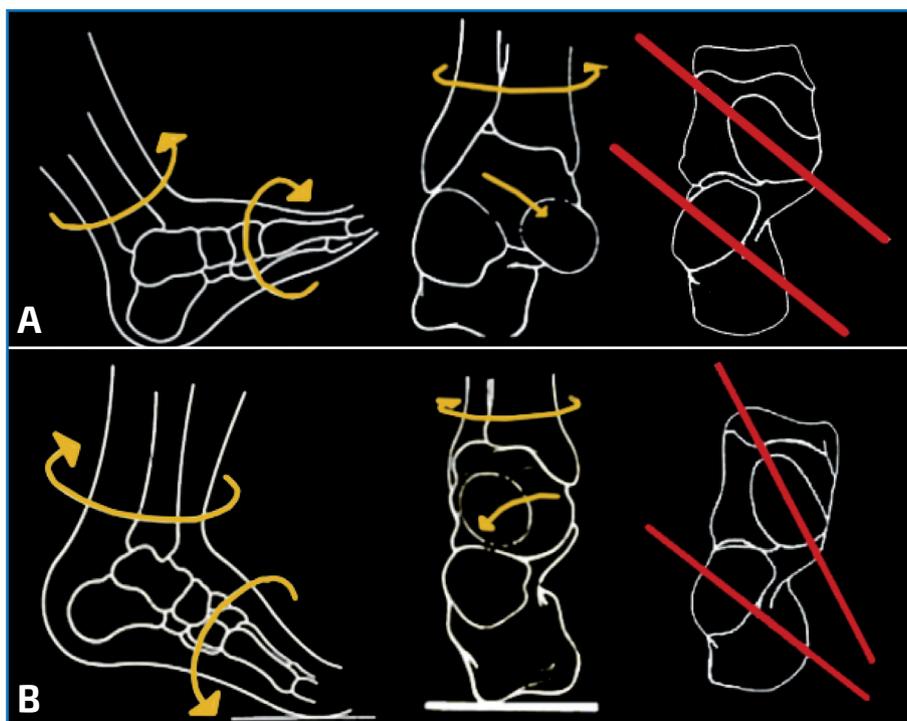


Figura 3. Movimientos combinados pierna-pie durante la marcha (véase el texto). A: en el choque de talón; B: en el despegue.

y calcaneocuboidea se encuentran en posición paralela, permitiendo libertad de movimiento en su interior. Esta flexibilidad que adquiere el pie sirve para amortiguar el impacto del pie con el suelo y la adaptación de la bóveda plantar al terreno.

En el momento de iniciar el despegue (**Figura 3B**) la tibia realiza una rotación externa y, por acción del tríceps sural y del tibial posterior, el tobillo realiza una flexión plantar y el retropié se sitúa en varo. En esta posición, los ejes de las articulaciones astragaloescafoidea y calcaneocuboidea se hacen divergentes, quedando bloqueada la articulación mediotarsiana. En esta situación, el pie adquiere una rigidez que le permite soportar de forma estable todo el peso del cuerpo en la fase propulsiva de la marcha.

Si analizamos diferentes situaciones patológicas, también podemos observar la interrelación entre tobillo y retropié.

Pondremos 2 situaciones como ejemplo:

1. Cuando existe una sinostosis congénita del tarso (**Figura 4A**), el pie pierde su capacidad de inversión-eversión. En estos casos, el tobillo adopta una forma concavoconvexa (**Figura 4B**) que le permite el movimiento de flexoextensión que le es propio y el de inversión-eversión propio del retropié.

2. En los casos de artrodesis de tobillo, el movimiento de flexoextensión es compensado por la subastragalina. Como hemos dicho anteriormente, esta articulación no puede realizar movimientos de flexoextensión aislados, sino que realiza movimientos complejos

de inversión-eversión. Como la inversión es más amplia (30°) que la eversión (10°), a largo plazo el retropié se va deformando en varo. Para intentar paliar esta complicación y mejorar la capacidad amortiguadora del pie en el tobillo artrodesado, es aconsejable artrodesar el tobillo en un ligero valgo.

En aquellos casos en los que la artrodesis de tobillo se indica en un pie parálitico, con ausencia de musculatura peronea, es mejor artrodesar a la vez el tobillo y la subastragalina, ya que en estos casos la evolución al varo del retropié es muy rápida (**Figura 4C**).

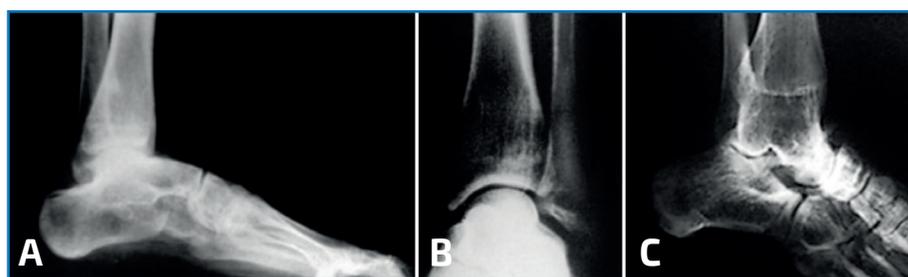


Figura 4. A: sinostosis congénita del tarso; B: tobillo cóncavo-convexo, adaptación funcional a la sinostosis; C: varo de retropié en artrodesis de tobillo parálitico.

Bibliografía

1. Stauffer RN, Chao EY, Brewster RC. Force and motion analysis of the normal, diseased, and prosthetic ankle joint. *Clin Orthop*. 1977;127:189-96.
2. Sammarco GJ. Biomechanics of the foot. En: Frankel VH, Nordin M (eds.). *Basic Biomechanics of the Musculoskeletal System*. 2nd ed. Philadelphia: Lea & Febiger; 1980. pp. 193-219.
3. Inman VT. *The joints of the ankle*. 2nd ed. Baltimore: Williams & Wilkins; 1991.
4. Lundberg A, Svennson OK, Nemeth G, Selvick G. The axis of rotation of the ankle joint. *J Bone Joint Surg Br*. 1989;71:94-9.
5. Root ML, Orien WP, Weed JH. Normal and abnormal function of the foot. *Clinical Biomechanics*. Vol. 2. Los Angeles: Clinical Biomechanics Corporation; 1977.
6. Viladot A, Roig-Puerta J, Escarpenter J. Biomecánica de la articulación subastragalina. *Podologie*. 1963;2(33).
7. Viladot Jr A. Biomechanics of the subtalar joint. *The Foot*. 1992;2(2):83-8.
8. Stormont DM, Morrey BF, An KN, Cass JR. Stability of the loaded ankle. *Am J Sports Med*. 1985;13:295-300.
9. De Doncker E, Kowalski C. *Cinesiologie et rééducation du pied*. Paris: Masson; 1979.
10. Rianza A. Contribución al conocimiento de la morfología, estructura, desarrollo y biodinámica del astrágalo humano. Tesis doctoral. Universidad de Oviedo; 1972.
11. Miralles R. Estudio de las lesiones producidas por la inversión del pie: zona de inversión. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Barcelona; 1979.