
CAPÍTULO DOS:**ANATOMÍA DE LA PIERNA HUMANA**

La pierna humana es un complicado sistema de segmentos, uniones, y músculos que comprenden nuestro miembro inferior. Aún así, en situaciones dinámicas como correr, saltar o brincar, nos movemos con mucha agilidad y sin parecer abrumados por la complicada tarea de controlar nuestras piernas. Esto se debe a un cuidadoso arreglo y afinación de todas las propiedades de las cuales la estabilidad y la robustez emergen. Los sistemas robustos y estables son fáciles de controlar (Blickhan et al., 2007).

Como se muestra en la figura 2.1, la estructura de la pierna humana está dividida en tres segmentos principales: la cadera, la pierna y el pie.

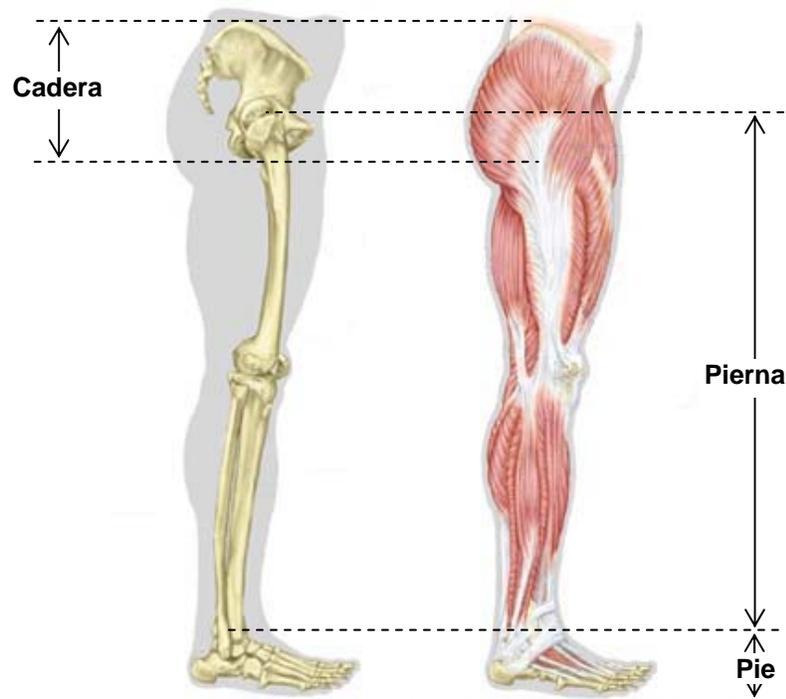


FIGURA 2.1 – Estructura ósea y muscular de la pierna humana.

Los tres planos del cuerpo humano como se muestra en la figura 2.2 son: el plano sagital, el plano transversal y el plano coronal.

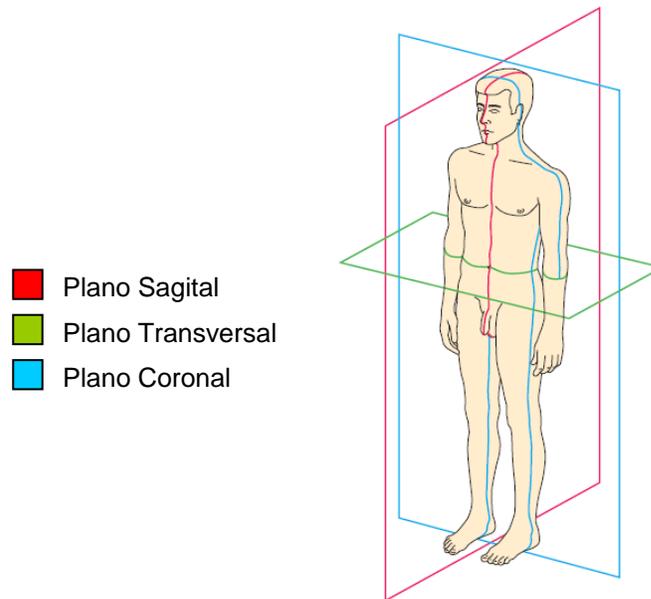


FIGURA 2.2 – Planos de división del cuerpo humano [1]

2.1 Anatomía de la Cadera

Cuando se habla de la marcha humana, la cadera tiene un rol muy importante. Esta diseñada para proveer de movilidad y estabilidad al cuerpo humano. Este proyecto se enfoca en las prótesis transfemorales, esto es aquellas utilizadas en personas que aún tienen más de la mitad de su fémur como se verá en el siguiente capítulo. Por esto a continuación únicamente se dará una breve descripción de la cadera.

2.1.1 Estructura ósea de la cadera

A grandes rasgos, las superficies óseas articulares de la cadera son la cabeza esférica del fémur y el acetábulo del hueso coxal (figura 2.3 “M”). El acetábulo está formado por el ilión (figura 2.3 “G”), el isquión (figura 2.3 “A”) y el pubis (figura 2.3 “C”),

en él se articula más de la mitad de la cabeza femoral (figura 2.3 “P”). El acetábulo consta de una superficie articular semiesférica y su borde, la ceja cotiloidea (figura 2.3 “N”).

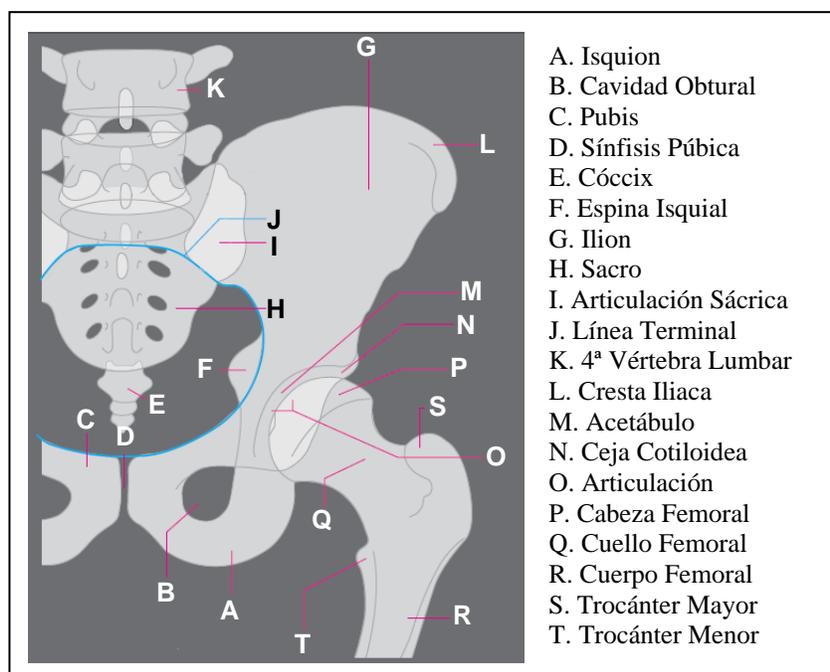


FIGURA 2.3 – Estructura ósea de la cadera humana. [1]

2.1.2 Músculos de la cadera

La cadera tiene 17 músculos comúnmente catalogados en cuatro grupos dependiendo de su orientación alrededor de la cadera: el grupo glúteo, el grupo lateral rotatorio, el grupo aductor y el grupo iliopsoas. A continuación se dará una breve descripción de algunos de los más importantes.

El músculo psoasiliaco (figura 2.4 “B”) se inserta en el trocánter menor (figura 2.4 “K”) siendo un potente flexor de la cadera y rotador externo del fémur. Por detrás están los músculos piriforme (figura 2.5 “D”), cuadrado crural (figura 2.5 “F”), obturador interno (figura 2.5 “B”) y geminos (figura 2.5 “E, G”) que son rotadores externos del fémur a nivel de la cadera. Desde el punto de vista funcional, el principal músculo de la cadera es el glúteo medio (figura 2.5 “H”) que se inserta distalmente en el trocánter mayor (figura 2.5

“K”). Su función es la abducción de la cadera, aunque sus fibras anteriores también ayudan en la flexión.

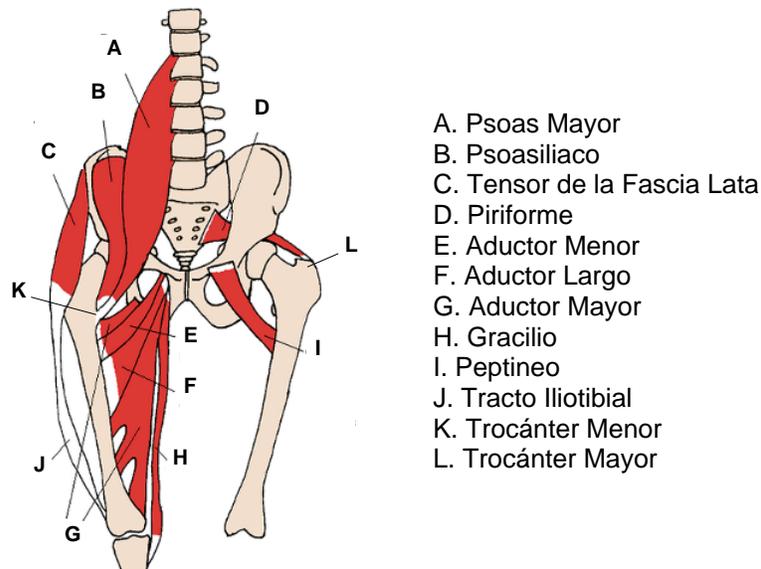


FIGURA 2.4 – Estructura muscular anterior externa de la cadera humana. [10]

Este músculo estabiliza la cadera y la pelvis durante la marcha. El glúteo menor (figura 2.5 “C”) ayuda en la acción del glúteo medio pero su eficiencia es mucho menor. Por otra parte el glúteo mayor (figura 2.5 “I”) se inserta hacia la parte posterior del fémur proximal siendo principalmente extensor de la cadera.

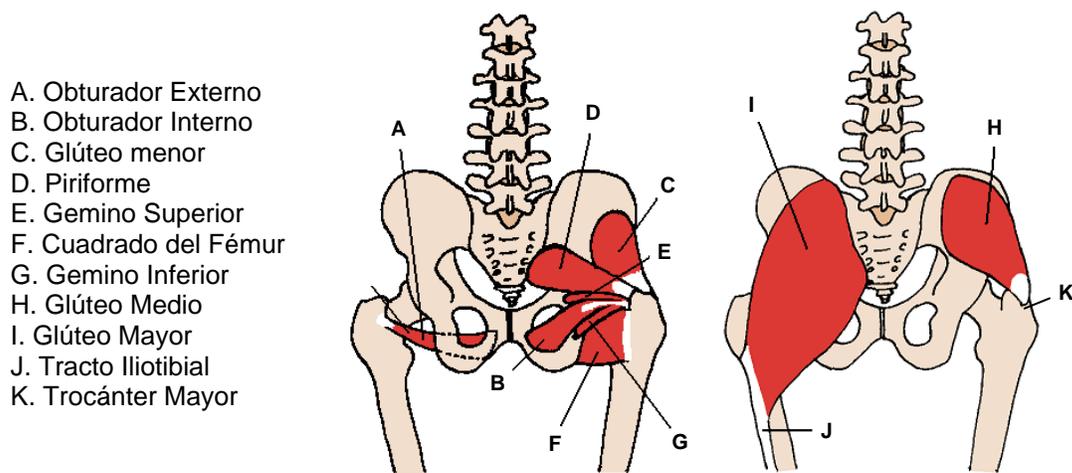


FIGURA 2.5 – (a) Estructura muscular anterior interna de la cadera humana.
(b) Estructura muscular posterior externa de la cadera humana. [11]

2.2 Anatomía de la Pierna

Estrictamente hablando la pierna humana es considerada como el segmento comprendido entre la cadera y el tobillo.

2.2.1 Estructura ósea de la pierna

En la figura 2.6 se muestran los cuatro huesos que conforman la pierna: en la sección superior el fémur y la rótula, en la sección inferior la tibia y el peroné.

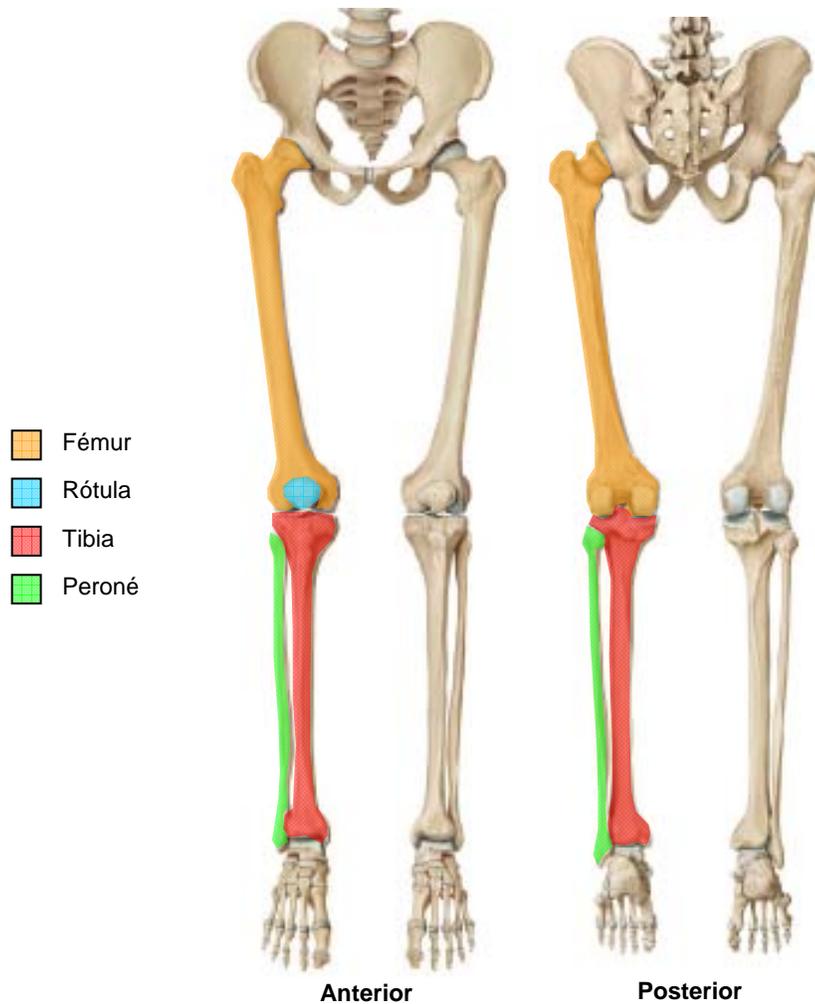


FIGURA 2.6 – Estructura ósea de la pierna humana. [1]

El fémur (figura 2.7) está localizado en el muslo, es el hueso más largo, fuerte y voluminoso del cuerpo humano. Está unido por medio de una articulación en su extremo superior al hueso coxal que conforma la cadera y en su extremo inferior donde se encuentra la róclea se une con la tibia en la rodilla por medio de la articulación femorotibial.

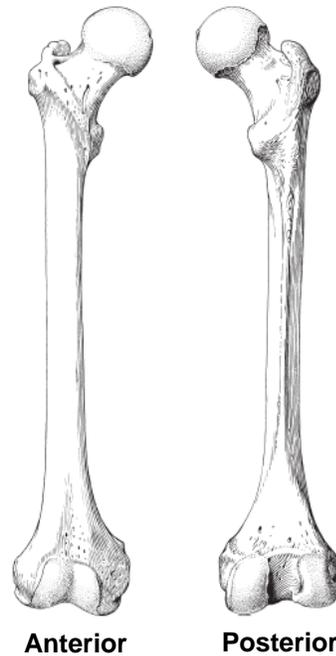


FIGURA 2.7 – Vista posterior y anterior del fémur. [4]

La rótula o patela (figura 2.8) es un hueso grueso que protege la parte frontal de la articulación de la rodilla. Su función principal es la extensión de la rodilla aumentando la palanca generada por el tendón en el fémur, aumentando el ángulo en el que éste actúa.



FIGURA 2.8 – Rótula [4]

La tibia es el segundo hueso más largo del cuerpo humano después del fémur. Está articulada en su parte superior con el fémur y la rótula, lateralmente con el peroné y en su parte inferior con el tobillo.



FIGURA 2.9 – Vista anterior y posterior de la tibia y peroné. [4]

El peroné o fíbula está localizado al lado de la tibia (figura 2.9) con la cual está conectado por su parte superior e inferior. Su pequeño extremo superior está situado hacia la parte trasera y por debajo de la cabeza de la tibia, excluido de la articulación de la rodilla. El extremo inferior se inclina un poco hacia delante proyectándose por debajo de la tibia formando la parte lateral de la articulación del tobillo.

2.2.2 Músculos de la pierna

Los músculos de la pierna están divididos en dos secciones: la sección superior (figura 2.10) y la sección inferior (figura 2.11). Para este proyecto solo mencionaremos los músculos principales.

- Sección superior de la pierna humana:

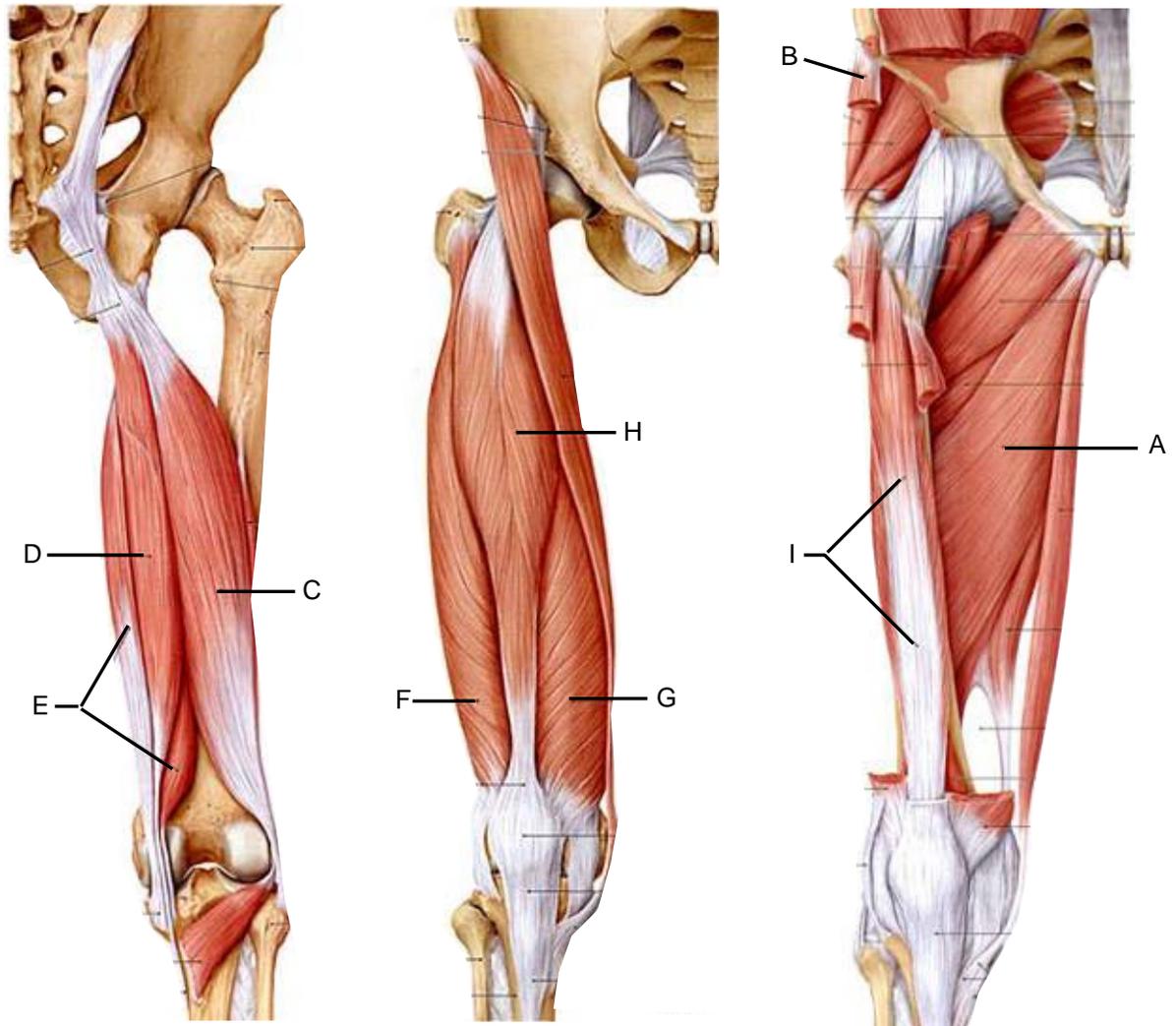


FIGURA 2.10 – Músculos principales de la sección superior pierna humana. (a) Músculos posteriores, (b) Músculos Anteriores, (c) Músculos Aductores. [12,13]

Los principales músculos de esta sección son:

- Aductores.-** Entre los músculos aductores, el más desarrollado y profundo es el aductor mayor (Figura 2.10 “A”). Este músculo se encuentra en forma de abanico desde la tuberosidad isquiática hasta el interior del fémur. Se encargan de acercar el muslo al centro del cuerpo.
- Tensor de la faja lata.-** Está situado en la parte lateral del muslo (Figura 2.10 “B”), iniciando desde la parte externa anterior de la pelvis y terminando del lado justo debajo de la rodilla. Su función es mover el muslo hacia fuera y flexionar la cadera.
- Bíceps femoral.-** Se origina en la tuberosidad isquiática y se extiende hasta la cabeza de la fíbula con un grueso tendón (Figura 2.10 “C”). En conjunto con los músculos semi-tendinoso (Figura 2.10 “D”) y semi-membranoso (Figura 2.10 “E”) su función es extender el muslo y flexionar la rodilla.
- Cuadriceps.-** Es un músculo grueso formado por cuatro partes: vasto medio (Figura 2.10 “G”), vasto intermedio (Figura 2.10 “I”), vasto lateral (Figura 2.10 “F”) y recto femoral (Figura 2.10 “H”). Los tres primeros se originan en la parte alta del fémur y terminan en un grueso tendón al nivel de la tibia incluyendo la rótula. El recto femoral inicia delante de la pelvis extendiéndose por encima del muslo y terminando en el mismo tendón al nivel de la tibia. Su función es extender la rodilla y flexionar la cadera.

- Sección inferior de la pierna humana

Está dividida en tres grupos principales: anterior, lateral, y posterior.

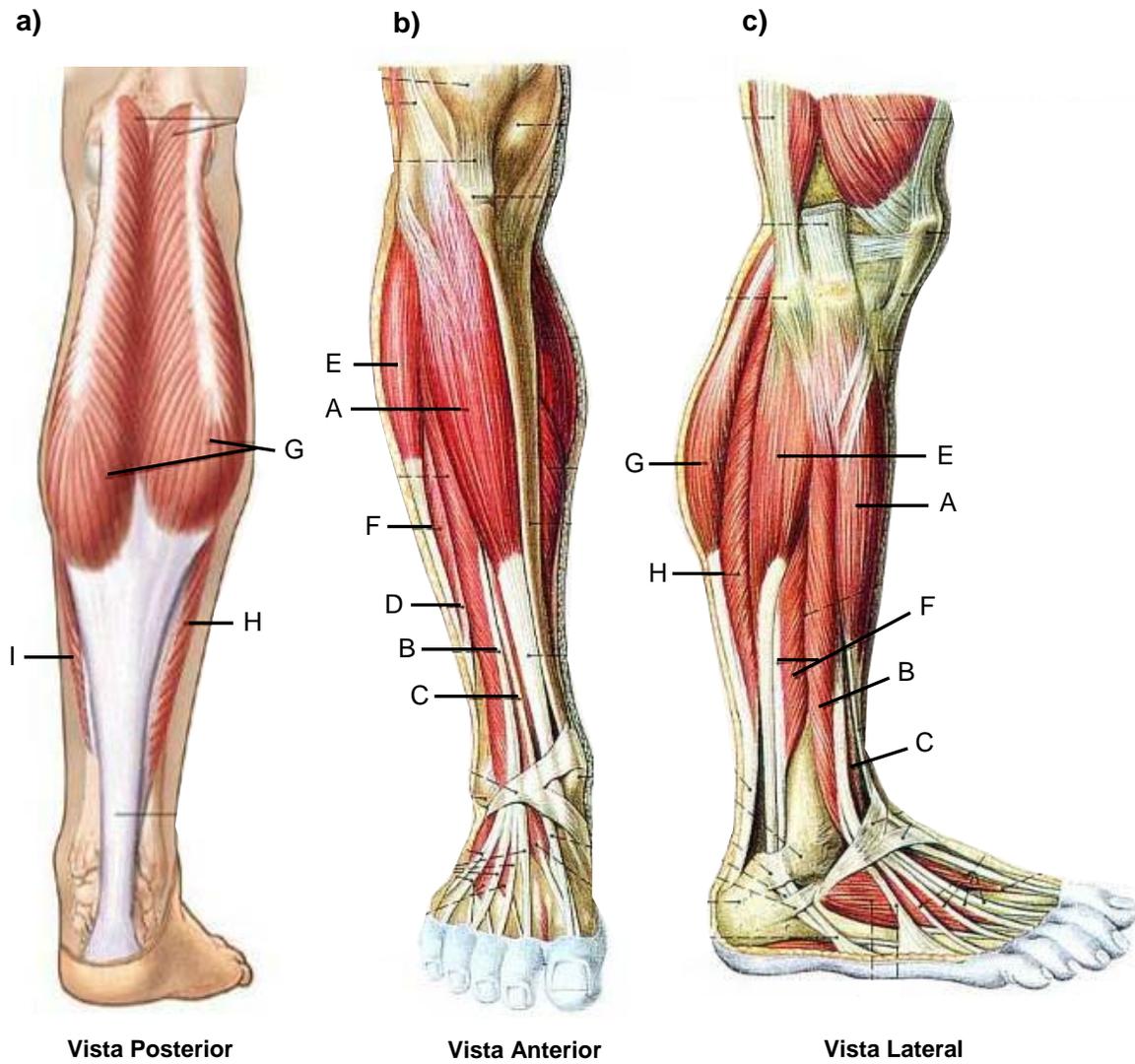


FIGURA 2.11 – Músculos principales de la sección inferior pierna humana.
 (a) Grupo anterior, (b) Grupo posterior, (c) Grupo lateral. [14,15]

Grupo anterior. Localizados en la espinilla. Los principales músculos de este grupo son:

- Tibial anterior (Figura 2.11 “A”).- Comienza en las tuberosidades de la tibia terminando por abajo en el cuneiforme I y en el extremo posterior del metatarsiano I

en el pie. Este músculo tiene la función de flexor, aductor y rotador del pie hacia adentro.

- Extensor largo de los dedos (Figura 2.11 “B”).- Comienza en el cóndilo lateral de la tibia extendiéndose en un tendón que se divide en 4 y se inserta en los 4 dedos del pie. Su función es la de extensor de los dedos y flexor del pie como dice su nombre.
- Extensor largo del dedo gordo (Figura 2.11 “C”).- Comienza en la cara interna del peroné y membrana interósea terminando en la falange distal del dedo gordo. Como su nombre lo dice su función es la de extensor del dedo gordo y flexor del pie.
- Peroneo tercero (Figura 2.11 “D”).- Se origina en la cabeza del peroné y termina en la base del V metacarpiano. Su función principal es la de flexor, abductor y rotador del pie hacia fuera.

Grupo lateral. Localizados a lo largo del lado externo de la pierna. Sus músculos principales son:

- Peroneo largo (Figura 2.11 “E”).- Comienza en la cabeza del peroné y cara profunda de la fascia y termina en el tubérculo externo del metatarsiano I. Su función es la de extensor, abductor y rotador del pie hacia fuera.
- Peroneo corto (Figura 2.11 “F”).- Comienza en la cara externa del peroné y termina en la tuberosidad del metacarpiano V. Su función es la de aductor del pie.

Grupo posterior. Localizados en la pantorrilla. Sus músculos principales son:

- Gastrocnemio (Figura 2.11 “G”).- Se origina en los cóndilos lateral y medial del fémur y en la cápsula de la rodilla terminando en el calcáneo. Es el más corto y

grueso de los músculos de la pantorrilla siendo también el más visible. Su función es la flexión plantar del pie.

- Soleo (Figura 2.11 “H”).- Se encuentra por abajo del gastrocnemio, comenzando en la cabeza de la fíbula y borde medio de la tibia y terminando en el calcáneo. Su función también es la flexión plantar del pie y elevar el talón.
- Plantar (Figura 2.11 “I”).- Comienza en el fémur por encima del cóndilo y termina en el calcáneo por medio del tendón de Aquiles. Ayuda también con la flexión plantar del pie.

2.3 Anatomía del Pie

2.3.1 Estructura ósea del pie

La estructura ósea del pie (figura 2.12) al igual que la de la mano es de las más complejas en el cuerpo humano. Está conformada por 26 huesos divididos en tres bloques principales: Tarso, Metatarso y Falanges.

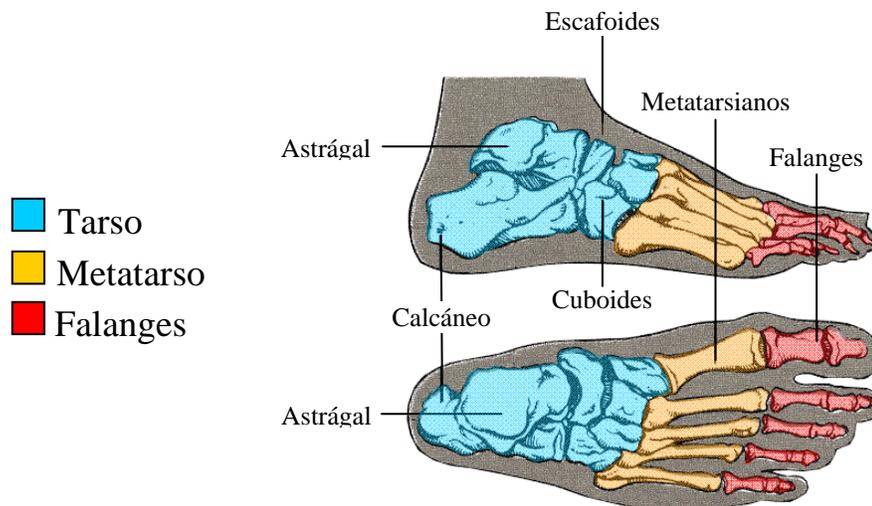


FIGURA 2.12 – Estructura ósea del pie humano.

Los huesos tarsianos es el nombre colectivo que se le da al grupo de siete huesos que forman el talón y el dorso del empeine, en éstos se incluye escafoides, cuneiformes (tres), cuboides, astrágalo y calcáneo (que también forma el talón). Estos huesos se encuentran generalmente en dos filas: la primera (que está más cerca del cuerpo) y la distal (que está más cerca de los dedos del pie). Los tarsianos primeros incluyen al astrágalo (el cual se articula con la tibia y el peroné) y el calcáneo, que juntos cargan la mayor parte del peso del cuerpo. Los tarsianos distales se articulan con el metatarso.

Los huesos metatarsianos son un conjunto de cinco huesos largos que se extienden entre el tarso y las falanges formando el pie medio. Son enumerados comenzando por el dedo gordo (No. 1) hasta el meñique (No. 5). En estos huesos se fijan los ligamentos de los dedos y del pie.

Las falanges son los huesos que forman los cinco dedos del pie. Cada dedo del pie tiene tres falanges, excepto el dedo gordo que sólo tiene dos. Empezando por las falanges más alejadas del pie que forman los extremos de los dedos se denominan falanges distales o terceras falanges, las siguientes son las falanges medias o segundas falanges, y las más cercanas al pie que se articulan con el metatarso se denominan primeras falanges.

2.3.2 Músculos del pie

Se dividen en músculos de la región dorsal y de la región plantar. En la región dorsal, hay un músculo, el perio, llamado también extensor corto de los dedos; contribuye a la extensión de los dedos. Los de la región plantar son varios músculos pequeños que carecen de importancia individual, pero sí la tienen en conjunto para reforzar y sostener los arcos del pie durante la locomoción, los diversos movimientos y posturas.

2.4 Articulaciones de la Pierna Humana

Las articulaciones son zonas de unión entre los huesos o entre los cartílagos del esqueleto. Cumplen una función muy importante al permitirte doblar las distintas extremidades de tu cuerpo. Si no existieran, el cuerpo sería una estructura totalmente rígida y no se podrían realizar movimientos.

2.4.1 La Cadera

La articulación de la cadera (figura 2.13) permite a toda la extremidad inferior moverse en los tres planos del cuerpo humano. Con esta articulación, la pierna puede moverse libremente en la cadera o la pierna puede estar fija y ser la cadera la que se mueve en contra de la pierna. Al caminar estas dos funciones se van alternando.

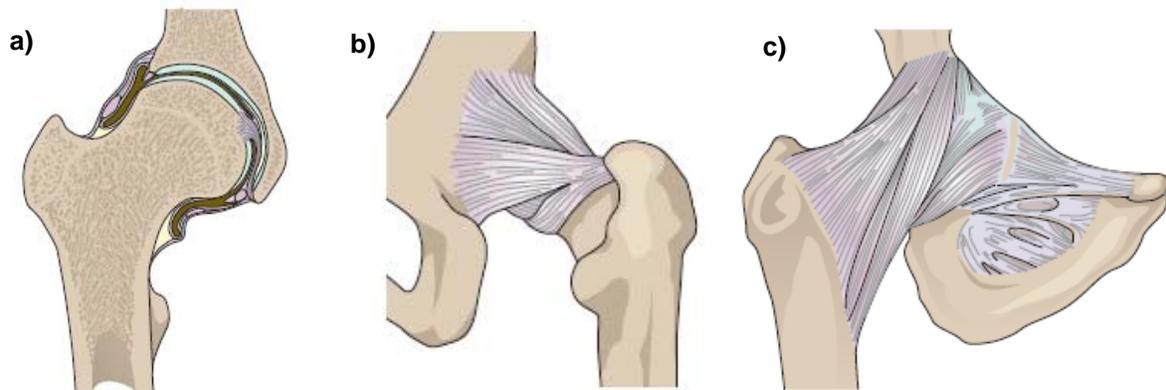


FIGURA 2.13 – Articulación de la cadera humana. (a) Corte sagital. (b) Vista posterior con tendones. (c) Vista anterior con tendones. [1]

Como se mencionó anteriormente, este proyecto se enfoca en prótesis transfemorales. Esta articulación no va a ser incluida en el prototipo, por lo que no es necesario saber a gran detalle cómo está compuesta. Lo más importante es saber en qué forma afecta esta articulación al segmento de fémur con el que todavía cuenta el amputado.

En la figura 2.14 se muestra cómo el ángulo entre la diáfisis y el cuello femoral (*ángulo cérvico-diafisario*) varía dependiendo de la edad del individuo. En el adulto el ángulo es de aproximadamente 125° - 135° en el plano frontal. En el recién nacido este ángulo es notablemente mayor (140°) mientras que en el anciano este ángulo puede ser mucho menor que 125° . También se tiene un ángulo de anteversión denominado “ángulo Q” de alrededor de 12° en el plano lateral, conforme avanza la edad este ángulo va aumentando ya que está relacionado con el ángulo cérvico-diafisario.

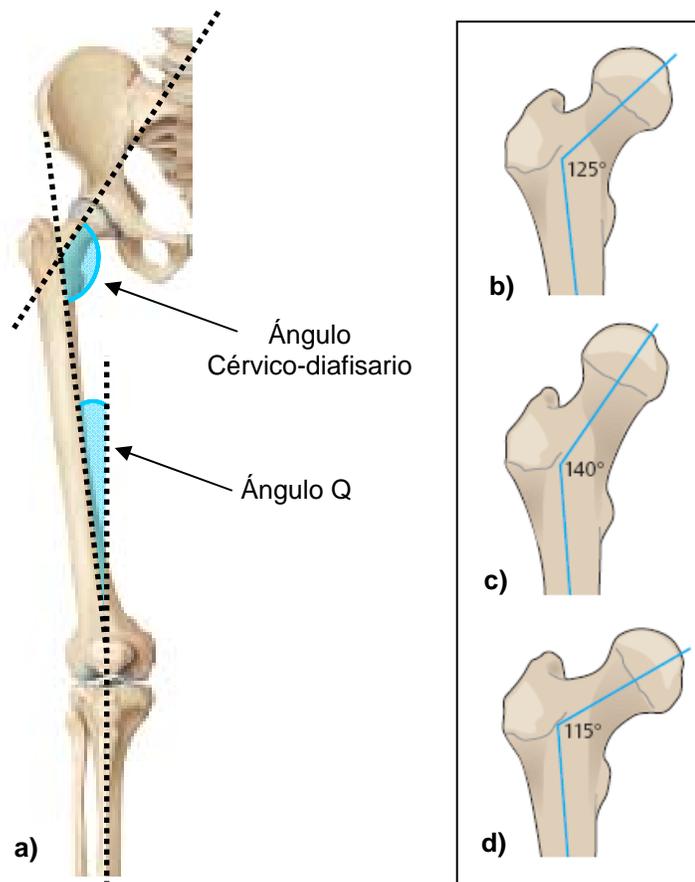


FIGURA 2.14 – (a) Relación del ángulo Q con el ángulo Cérvico-diafisario. Ángulo Cérvico-diafisario (b) en el adulto promedio (c) en el recién nacido (d) en el anciano. [1]

2.4.1.1 Rango de Movimiento de la Cadera

Como se muestra en la figura 2.15 los tres movimientos básicos de la pierna gracias a la articulación de la cadera son:

Extensión y Flexión: Se generan alrededor del plano transversal. La extensión de la pierna hacia atrás tiene un ángulo máximo de aproximadamente 15° , mientras que la flexión hacia el tórax tiene un ángulo máximo entre $130^\circ - 140^\circ$.

Abducción y Aducción: Se generan sobre el eje sagital. La abducción tiene un rango de movimiento de $30^\circ - 45^\circ$ alejándose del cuerpo, mientras que la aducción solo tiene un rango de $20^\circ - 30^\circ$ cruzando sobre la otra pierna.

Rotación: Alrededor de un eje vertical. La rotación interna se genera al rotar el muslo hacia el cuerpo, la pierna flexionada tiene un rango máximo de $30^\circ - 45^\circ$. En el caso contrario, al rotar el muslo hacia fuera, la pierna flexionada tiene un rango de $40^\circ - 50^\circ$.

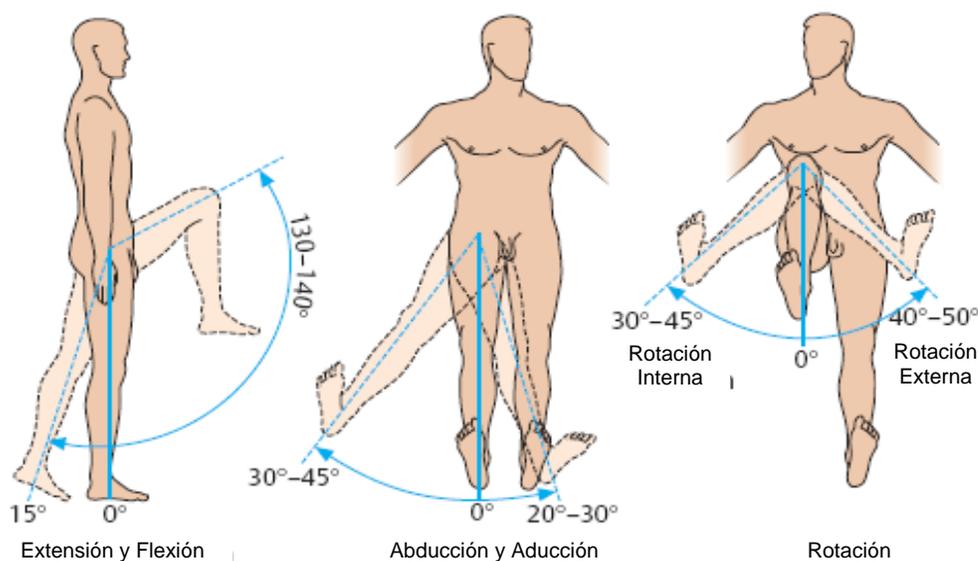


FIGURA 2.15 – Rangos de movimiento de la articulación de la cadera. [1]

2.4.2 La Rodilla

La rodilla (figura 2.16) es la articulación más grande del cuerpo humano. Es una articulación compuesta, formada por la acción conjunta del fémur, tibia, rótula y dos discos fibrocartilagosos. Consiste en la articulación entre el cóndilo femoral y la tibia, y la articulación entre la superficie rotular del fémur y la rótula. Los dos meniscos adaptan la superficie articular del fémur y la tibia entre ellas para incrementar la superficie de transmisión de fuerza.

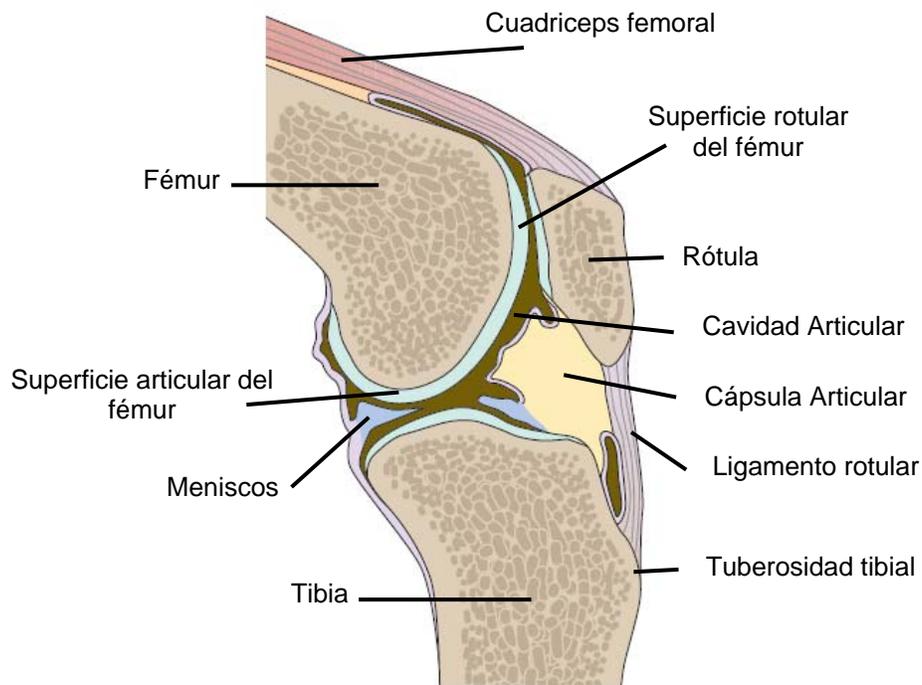


FIGURA 2.16 – Corte sagital de articulación de rodilla humana.[1]

Los movimientos de la rodilla son guiados (y restringidos) por dos grupos de ligamentos (figura 2.17):

- Ligamentos colaterales.- medial y lateral
- Ligamentos cruzados.- anterior y posterior.

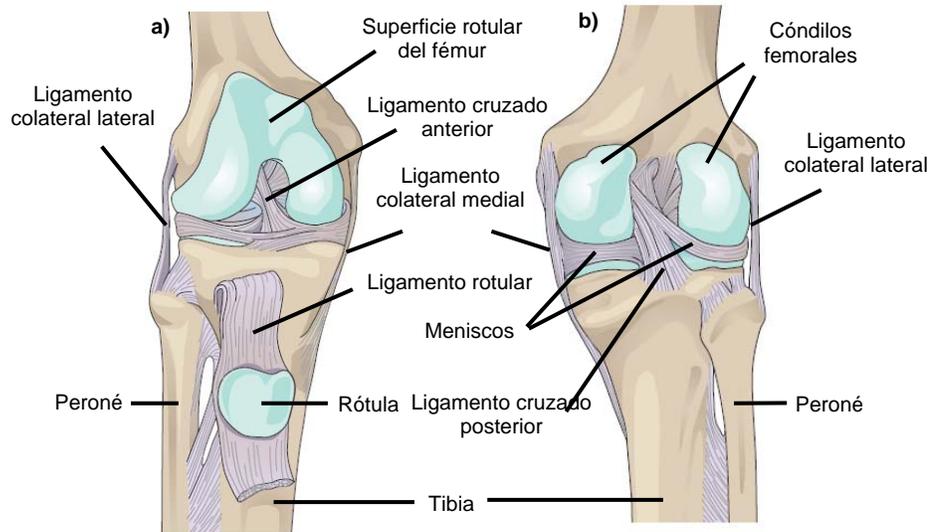


FIGURA 2.17 – Articulación de rodilla humana. (a) Vista anterior (la rótula y sus ligamentos se reflejan hacia abajo), (b) Vista posterior. [1]

2.4.2.1 Músculos Involucrados en el Movimiento de la Rodilla

Las dos funciones básicas de la rodilla necesarias para este proyecto son la flexión y extensión. Se tienen dos músculos principales que se encargan de estas dos funciones:

- Flexión: Bíceps femoral (figura 2.18 a).
- Extensión: Cuadríceps femoral (figura 2.18 b).

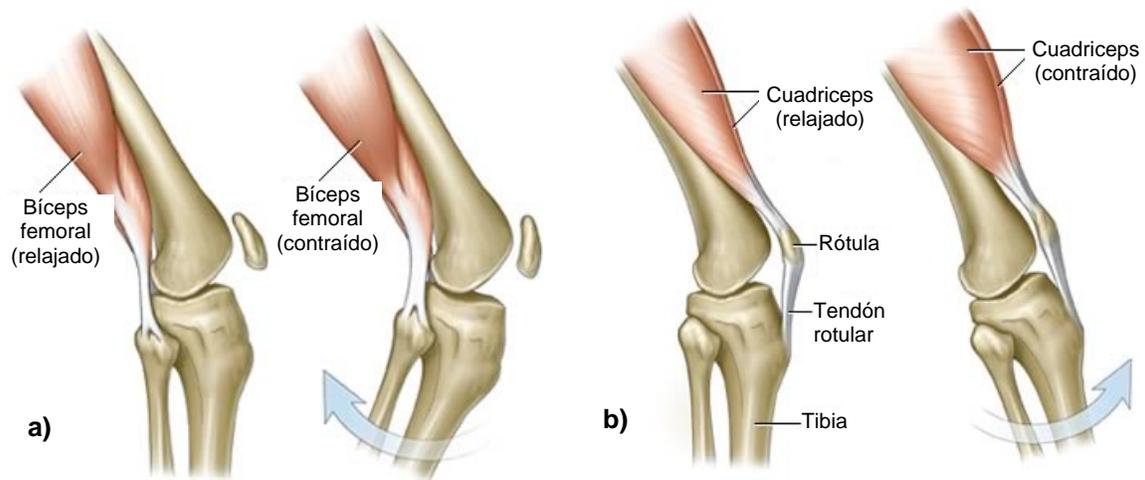


FIGURA 2.18 – Movimiento de la rodilla humana. (a) Flexión contrayendo bíceps femoral. (b) Extensión contrayendo cuadríceps femoral. [1]

2.4.2.2 Rango de Movimiento de la Rodilla

Para este proyecto de tesis es necesario saber los rangos de movimiento generados por las diferentes articulaciones, para poder así reproducirlos en el prototipo.

Al flexionar la rodilla, se genera un ángulo entre el fémur y la tibia (figura 2.19); este ángulo varía dependiendo de la flexibilidad de las personas. Este ángulo va desde 0° cuando la pierna está totalmente extendida creando una línea recta el fémur con la tibia, hasta 155° cuando la pierna está totalmente flexionada, tocando el glúteo con el talón. Si se fuerza un poco el cuádriceps, se puede tener una hiperextensión de hasta -10° tomando como referencia la pierna en posición recta en un ángulo de 0° .

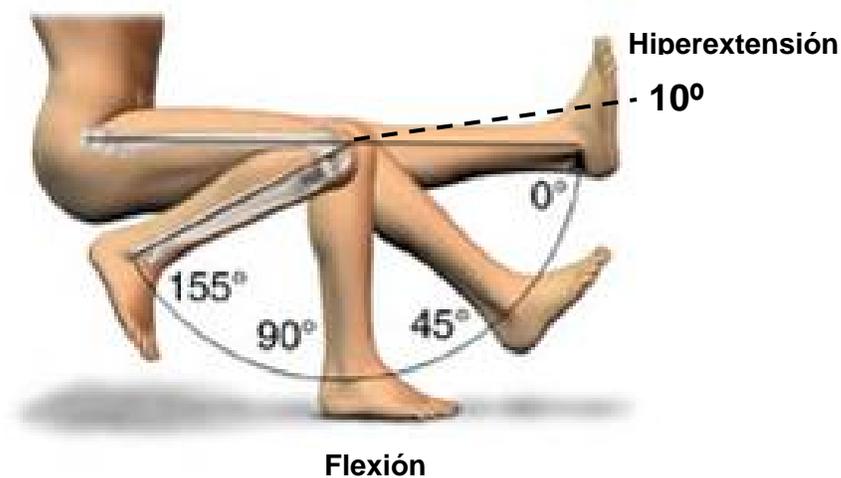


FIGURA 2.19 – Rango de movimiento de la rodilla humana. [16]

2.4.3 El Tobillo

El tobillo (figura 2.20) en realidad consta de dos articulaciones. La articulación del tobillo que está formada por la tibia, peroné y el astrágalo en el pie; y la articulación intertarsal formada por el astrágalo del pie con el hueso calcáneo y el escafoides. Para este proyecto solo nos enfocaremos en la articulación del tobillo, ya que esta es la que más se utiliza al caminar en una superficie plana.

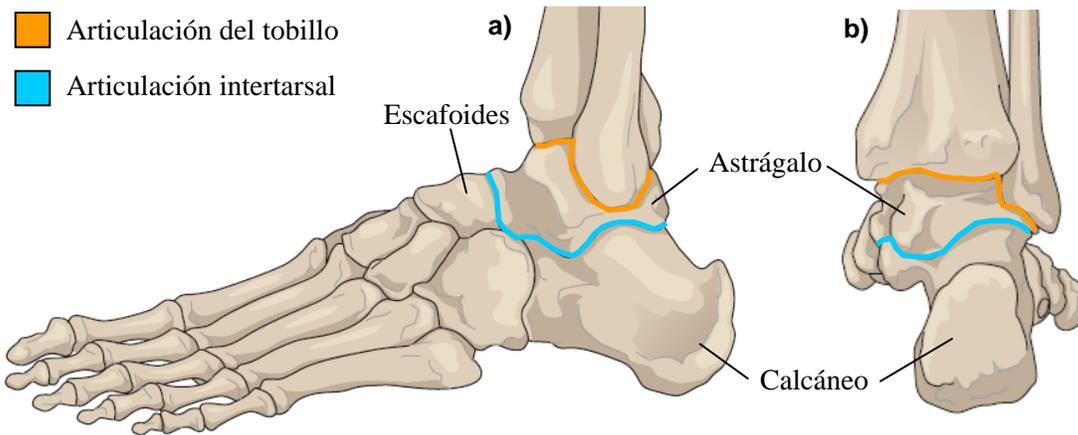


FIGURA 2.20 – Articulaciones del tobillo. (a) Vista lateral. (b) Vista posterior. [1]

2.4.3.1 Músculos Involucrados en el Movimiento del Tobillo

Los músculos de la sección inferior de la pierna actúan sobre la articulación del tobillo generando los dos movimientos principales de esta articulación (figura 2.21):

- Dorsiflexión .- levantar la punta del pie hacia la espinilla.
- Flexión Plantar.- flexionar el pie de punta.

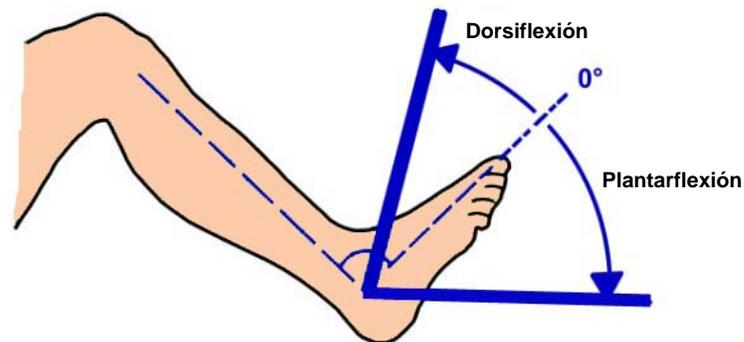


FIGURA 2.21 – Dorsiflexión y flexión plantar del tobillo humano. [17]

Los músculos encargados de la dorsiflexión se encuentran en la parte anterior de la sección inferior de la pierna (espinilla). Los principales son:

- Tibial anterior
- Extensor propio del dedo gordo
- Extensor común de los dedos

Los músculos encargados de la flexión plantar se encuentran principalmente en la parte posterior de la sección inferior de la pierna (pantorrilla). Los principales son:

- Soleo
- Gastrocnemio

Estos dos músculos están unidos al hueso calcáneo (talón) por medio del tendón de Aquiles. En conjunto actúan los músculos de la parte lateral de la pantorrilla para ayudar con la flexión plantar. Los principales son:

- Peroneo lateral largo
- Peroneo lateral corto

2.4.3.2 Rango de Movimiento del Tobillo

La articulación del tobillo genera un ángulo entre la tibia y el pie (figura 2.22 a). Como se muestra en la figura cuando el pie se encuentra en posición neutral (0° en el plano horizontal) el ángulo entre el pie y la tibia es de 90° . Dependiendo de la flexibilidad de la persona el pie en dorsiflexión (acercar la punta del pie a la espinilla) tiene un ángulo máximo de 30° con respecto al horizonte, mientras que en la flexión plantar (pararse de puntas) se tiene un rango mayor de movimiento con un ángulo máximo de 50° .

Cuando el pie está fijo, la parte inferior de la pierna se puede mover hacia delante y hacia atrás libremente. Generando un ángulo entre la tibia y la punta del pie (figura 2.21 b). Obviamente se tiene el mismo rango de movimiento que al mover el pie libremente.

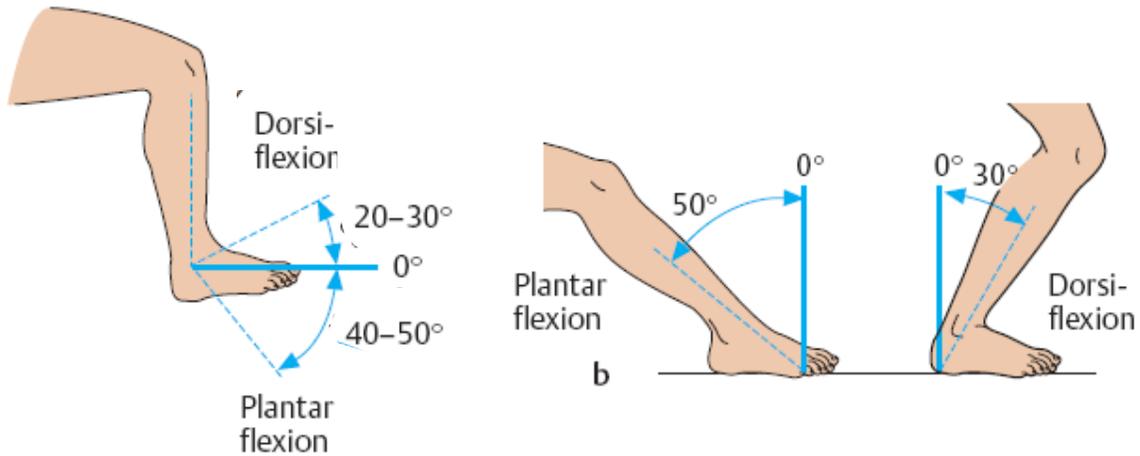


FIGURA 2.22 – Rangos de movimiento del tobillo humano. [1]

2.4.4 Los Dedos

Aun cuando el pie tiene muchas articulaciones, para este proyecto la más importante es la articulación entre los metatarsos y las falanges (figura 2.23). Esta articulación es la que permite que los dedos se muevan hacia arriba y hacia abajo. Como se mostrará más adelante, las falanges cumplen un papel muy importante durante la marcha.

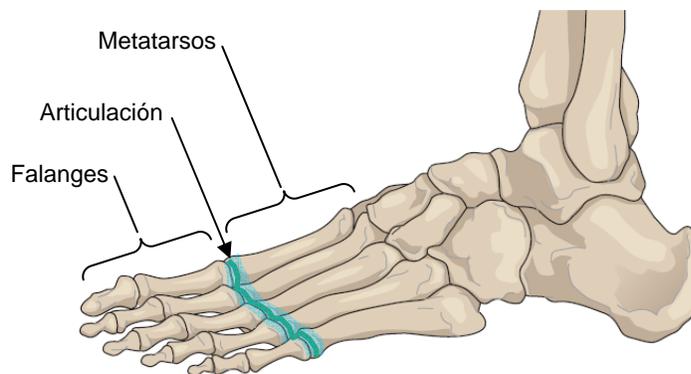


FIGURA 2.23 – Articulación de los dedos del pie. [1]

2.4.4.1 Músculos Involucrados en el Movimiento de los Dedos

Los músculos de la parte inferior de la pierna tienen largos tendones que atraviesan el tobillo hasta llegar a las falanges (figura 2.24). Estos tendones se encargan de flexionar los dedos hacia abajo y extender los dedos hacia arriba.

Los dos músculos que están fijados en la parte inferior de las falanges y que se encargan de flexionar los dedos hacia abajo son:

- El músculo flexor común de los dedos
- El músculo flexor propio del dedo gordo

Los dos músculos que están fijados en la parte superior de las falanges y que se encargan de extender los dedos hacia arriba:

- El músculo extensor común de los dedos
- El músculo extensor propio del dedo gordo

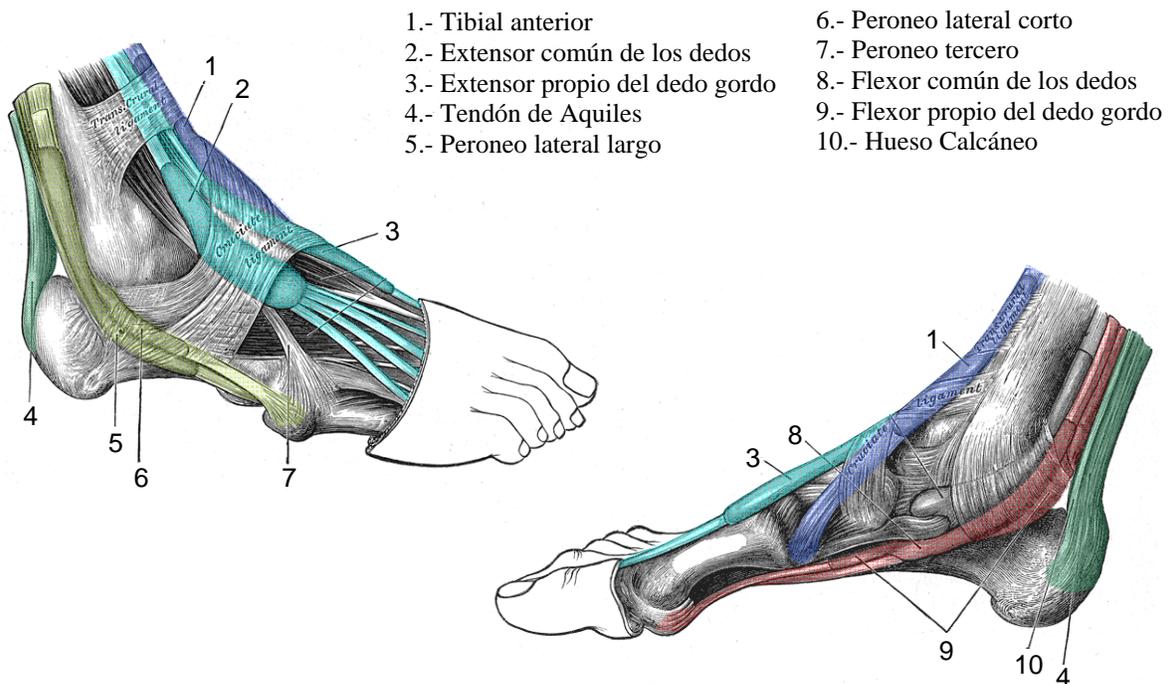


FIGURA 2.24 – Estructura muscular del pie humano. [18, 19]

2.4.4.2 Rango de Movimiento de los Dedos

Cuando el pie está en estado neutro (0° con respecto al horizonte) los dedos tienen un rango de flexión de 70° hacia abajo (figura 2.25 a). Utilizando únicamente los músculos para extender los dedos hacia arriba el rango de movimiento está alrededor de los 60° (figura 2.25 b), pero al pararse de puntas este rango se puede extender hasta los 70° .

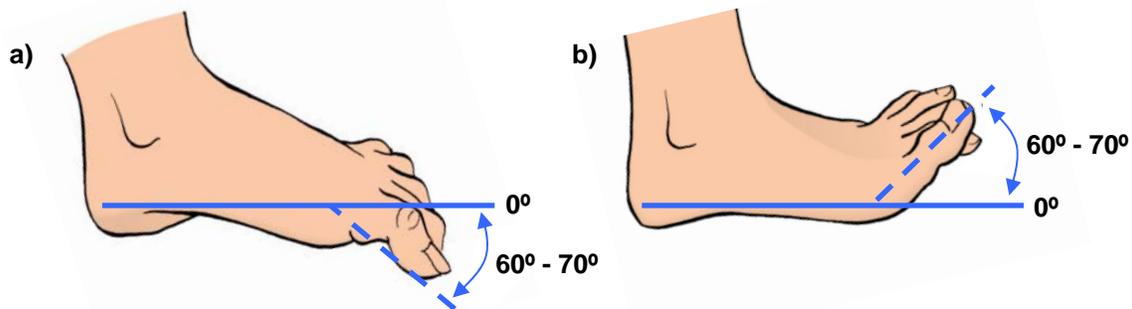


FIGURA 2.25 – Rango de movimiento de los dedos del pie. (a) Extensión (b) Flexión [20].

2.5 Resumen

En este capítulo se describió brevemente la anatomía de la pierna humana. Los principales huesos, músculos y ligamentos que la conforman. Se prestó especial atención a las cuatro articulaciones involucradas en la marcha humana (cadera, rodilla, tobillo y falanges) y se identificaron los principales músculos que actúan sobre cada una de ellas permitiendo la extensión y flexión de los diferentes segmentos de la pierna humana. Finalmente se describieron los rangos de movimiento de cada segmento con respecto a su articulación para entender cuáles serán las restricciones de movimiento del prototipo.

En el siguiente capítulo se describirá la biomecánica del ciclo de la marcha humana normal, en donde se utilizan los músculos descritos anteriormente para generar una coreografía de movimientos cíclicos que permiten desplazarse al hombre en dos piernas.