



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Estudio ecográfico, anatómico e histológico de la fascia profunda de la extremidad superior e inferior con aplicaciones clínicas y terapéuticas

Sara Ortiz Miguel

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT^{DE}
BARCELONA

ESTUDIO ECOGRÁFICO, ANATÓMICO E HISTOLÓGICO DE LA FASCIA PROFUNDA DE LA EXTREMIDAD SUPERIOR E INFERIOR CON APLICACIONES CLÍNICAS Y TERAPÉUTICAS

PROGRAMA de DOCTORADO de MEDICINA Y INVESTIGACIÓN TRANSLACIONAL
FISIOPATOLOGÍA DE LAS ENFERMEDADES MEDICO-QUIRURGICAS
FACULTAD DE MEDICINA y CIENCIAS DE LA SALUD (CAMPUS BELLVITGE)
UNIVERSITAT DE BARCELONA

Sara Ortiz Miguel

Directores: Dr. Albert Pérez Bellmunt

*Unidad de estructura y función
Universitat Internacional de Catalunya*

Dr. José Luis Agulló Ferre

*Unidad de anatomía y embriología humana
Departamento de patología y terapéutica experimental
Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud
Universitat de Barcelona*

Tutor: Dr. Josep Maria de Anta Vinyals

*Unidad de anatomía y embriología humana
Departamento de patología y terapéutica experimental
Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud
Universitat de Barcelona*

Junio 2023

AGRADECIMIENTOS

A mi querido hijo, por ser un rayo de vida y alegría, por haber bajado a este mundo a estar conmigo, mientras aún estoy en crecimiento. Porque siempre me impulsa a mejorar y crecer y es lo mejor que me ha pasado nunca.

A mi madre, por todo lo que ha hecho por mí, por su papel en mi maternidad, y su soporte laboral. Sin ella, todo lo que hubiera venido después de la maternidad no hubiera existido y es la razón por la que ha sido todo posible.

A mi padre, por su ayuda también en la maternidad, por los momentos en los que cuida y mima al peque, por lo bien que se lo pasan juntos y por convertirse en un referente para él.

A mi hermana por haberme criado junto a ella, y todos los momentos que pasamos juntas.

A mi abuelo, por el cariño con el que me ha tratado y siempre creer en la mejor versión de mí, por toda la energía que me ha dedicado y que me ha nutrido. A mi abuela, por tener siempre la puerta abierta para cuidarnos y una dulce vejez de la que disfrutar de ella un ratito más.

A mi primo Alberto, por haber tenido la suerte de criarme junto a él y mi hermana. Por mis primeros momentos de libertad haberlos vivido con la seguridad de que siempre estaba junto a nosotras.

A mi tía Ana, porque siempre está para dar soporte y ánimos y por ser un referente de generosidad.

A mis primos Carlos y Alejandro, por la paciencia que me están dedicando en encaminarme en lo que quiero que sea mi segundo reto laboral.

A Dani, Júlia y Oriol, porque siempre están. A Paula, Isabel, Marina, Irene, Laura porque, aunque no hablemos tanto también están siempre.

A Mónica, Laia, Núria por los momentos de intimidad vividos en la carrera, por su soporte, apoyo y cariño constante y que aún sigamos todas queriendo crear más momentos juntas.

A Raquel por tener la suerte de poderla ver más a menudo y la confianza depositada en mí.

A Alexis y Friedrich, por todos los ánimos recibidos en la carrera, por celebrar conmigo cada batalla mientras estudiaba y el cariño que me dedicaron.

Al grupo de franceses, Alexis, Many, Friedrich, David y Aymeric, por los que ya no están, pero estuvieron, a los cuáles les deseo que tengan una vida feliz y próspera.

A Guilhem por aún seguir lejos pero en contacto.

A mis referentes anatómicos: Dr. Albert Pérez, Dra. Maribel Miguel, por ser un ejemplo laboral y didáctico, a los cuáles les debo el reto de presentar la tesis.

A mis directores de tesis Dr. Albert Pérez y Dr. Pep Agulló por la paciencia y dedicación.

Al Dr Josep Maria de Anta, mi tutor de tesis, por darme la primera oportunidad de trabajar en la Universidad de Barcelona.

A mis primeros jefes: Dr. Albert Pérez, Dra. Marta Coll y Dr. Mariano Gacto por tener la confianza de contratarme y a Pere por su confianza.

A Dr. Casimiro Javierre y la Dra. Maite Rebollo, por incluirme en un nuevo reto en el cuál tengo la suerte de participar.

A Dra. Ingrid Möller y Dra Maribel Miguel por tener la suerte de coincidir con ellas y compartir conmigo su conocimiento.

A Pere, Raúl y Maribel, por lo agradable que hacen el máster de disección.

A mis compañeros de la UIC. En especial a la Dra Maria Antonia Arbòs por todo el soporte y buen trato; a Dra Betlem Mezquita también por su soporte, a Dr Toni Parserises y Dr Jacobo Rodriguez por lo agradable que ha sido trabajar con ellos y a Judith Pascual por lo mucho que me facilita siempre mi trabajo y lo eficaz que es.

A José Luis y Gemma y el resto de personal de la sala de disección del campus de Bellvitge por su amabilidad y facilitarme la investigación.

A los donantes, por su altruismo, sin ellos cualquier investigación anatómica sería muy difícil.

Al Dr. Joan Carles Ortiz, por todo el soporte estadístico.

Al Dr. Joan Blasi per su orientación en el estudio histológico.

A mis compañeros de la UdG: Gerard, Alejandro, Maria y Mariano, por su ayuda y el soporte.

A mis profesores de la Gimbernat, a todos en general, por su buen trato, dedicación y estima, por el interés que le dedicaron a su trabajo.

A mi director del TFM Joaquín, también por su dedicación y paciencia.

A mis profesoras de bachillerato: Rosa, Mercé, Carme y Jetzabel, por el tiempo dedicado, especialmente a Mercé por ayudarme tanto.

ABREVIATURAS

ECC:	MÚSCULO EXTENSOR CUBITAL DEL CARPO
ED:	MÚSCULO EXTENSOR DE LOS DEDOS
ELD:	MÚSCULO EXTENSOR LARGO DE LOS DEDOS
EQD:	MÚSCULO EXTENSOR DEL 5º DEDO
FCC:	MÚSCULO FLEXOR CUBITAL DEL CARPO
FLD:	MÚSCULO FLEXOR LARGO DE LOS DEDOS
FLDG:	MÚSCULO FLEXOR LARGO DEL DEDO GORDO
FRC:	MÚSCULO FLEXOR RADIAL DEL CARPO
NPS:	NERVIO PERONEO SUPERFICIAL
PC:	MÚSCULO PERONEO CORTO
PL:	MÚSCULO PERONEO LARGO
PR:	MÚSCULO PRONADOR REDONDO
RMC:	RESONANCIA MAGNÉTICA COMPUTARIZADA
TA:	MÚSCULO TIBIAL ANTERIOR
TP:	MÚSCULO TIBIAL POSTERIOR
TAP:	TEJIDO ADIPOSEO PROFUNDO
TAS:	TEJIDO ADIPOSEO SUPERFICIAL

LISTA DE ARTÍCULOS

Ortiz-Miguel S, Miguel-Pérez M, Navarro J, Möller I, Pérez-Bellmunt A, Agullo JL, Ortiz-Sagrìstà J, Blasi J, Martinoli C

Compartments of the antebrachial fascia of the forearm: clinically relevant ultrasound, anatomical and histological findings. .

Surg Radiol Anat. 2021 Oct;43(10):1569-1579. doi: 10.1007/s00276-021-02736-3

IF: 1.354 Q3: JCR (ANATOMY & MORPHOLOGY); Q2: Scimago.

Ferre-Martinez A, Miguel-Pérez M, Möller I, **Ortiz-Miguel S**, Pérez-Bellmunt A, Ruiz N, San-juan X, Agullo J, Ortiz-Sagrìstà J, Martinoli C

Possible Points of Ulnar Nerve Entrapment in the Arm and Forearm: An Ultrasound, Anatomical, and Histological Study. .

Diagnostics (Basel). 2023 Apr 3;13(7):1332. doi: 10.3390/diagnostics13071332

IF: 3.992 Q2: JCR (MEDICINE, GENERAL & INTERNAL); Q1: Scimago.

Ortiz-Miguel S, Miguel-Pérez M, Blasi J, Pérez-Bellmunt A, Ortiz Sagristà JC, Möller I, Agullo JL, Iglesias P, Martinoli C.

Compartments of the crural fascia: clinically relevant ultrasound, anatomical and histological findings.

Surg Radiol Anat 2023.

Pendiente de la revisión del editor, desde el día 12 mayo, tras la primera revisión corregida del artículo.

RESUMEN

Título: Estudio ecográfico, anatómico e histológico de la fascia profunda de la extremidad superior e inferior con aplicaciones clínicas y terapéuticas.

Introducción: La fascia es un tejido mesenquimal indiferenciado que envuelve órganos o tejidos y de gran importancia para el sistema musculoesquelético, así como, nervios, paquetes vasculares y órganos de la anatomía humana. Se han descrito varios tipos de fascia y una de ellas es la fascia muscular o también conocida como fascia profunda, dispuesta inferiormente al tejido celular subcutáneo. Está compuesta por tejido conectivo denso con numerosas fibras de colágeno. Esta composición favorece su visualización y estudio ecográfico, de gran importancia para su detección y por la aplicación clínica. Esta fascia rodea los diferentes grupos musculares, los compartimenta y también tiene otras funciones como disipar la tensión, y absorber impactos para proteger estructuras adyacentes, a cambio de reducir su elasticidad. Sin embargo, esto puede implicar una reducción de la adaptación de este tejido, produciendo una patología compresiva sobre las estructuras adyacentes y de esta manera intervenir activamente en los síndromes compartimentales tanto en la extremidad superior como en la extremidad inferior.

El estudio ecográfico de dicha fascia muscular en la extremidad superior e inferior permite observar también la relación con las estructuras colindantes como los nervios periféricos o estructuras vasculares y ayudar en la detección de posibles compresiones o atrapamientos de nervios periféricos.

Hipótesis: Un mayor conocimiento de la fascia profunda en la extremidad superior e inferior a través de la ecografía, de la disección anatómica e histología puede ayudar en el

diagnóstico y tratamiento de distintas patologías del sistema musculoesquelético como son el síndrome compartimental y el atrapamiento de nervios periféricos.

Objetivos: El objetivo principal fue estudiar la fascia antebraquial o profunda del antebrazo, y la fascia crural o de la pierna ecográfica, anatómica e histológicamente, observando la relación con determinados músculos y estructuras vasculonerviosas, y su posible relación con el síndrome compartimental y atrapamientos nerviosos. Además, también se analizó la correlación entre las imágenes obtenidas mediante el estudio ecográfico y la disección anatómica en el antebrazo y pierna y un estudio histológico de las fascias en varios puntos así como de la relación de la misma con determinados músculos.

Material y métodos: Se analizaron ecográfica, anatómica e histológicamente 62 extremidades superiores y 21 extremidades inferiores de donantes y una extremidad de un feto de 29 semanas pertenecientes a la Sala de disección de la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud (campus de Bellvitge) durante un periodo de 4 años. El estudio se inició con la fascia muscular del antebrazo, seguido por el estudio de la relación de la fascia y sus tabiques en relación con el nervio cubital, para finalizar con el estudio de la fascia muscular o profunda de la extremidad interior. Para ello siempre se siguió la misma pauta, se empezaba con el estudio ecográfico inyectando contraste en distintos puntos en relación y se seguía con el estudio anatómico a través de la disección, para finalizar con el estudio histológico.

Resultados: El estudio ecográfico permitió identificar la fascia antebraquial, muscular o profunda del antebrazo como una línea hiperecogénica, observándose una relación muy estrecha de esta fascia con los músculos extensor cubital del carpo, extensor del quinto dedo y músculo ancóneo en el compartimiento posterior, y el flexor radial del carpo en el compartimiento anterior, a los que aislaba y por ello puede predisponer a un síndrome compartimental en condiciones adversas. El estudio anatómico comprobó estas relaciones

ecográficas y el estudio histológico observó que las mediciones realizadas ecográficamente eran muy similares a las histológicas y oscilaban entre 0.571 mm la fascia que cubría el músculo anconeal y 0,390 mm la más delgada y que cubría al músculo extensor del quinto dedo. Respecto a la relación de la fascia muscular y estructuras nerviosas como el nervio cubital, el estudio ecográfico permitió observar el paso de este nervio por el tabique intermuscular medial (expansión de la fascia muscular hacia el húmero) y ver como se alteraba el diámetro de dicho nervio cuando lo atraviesa. Así mismo, la ecografía permitió observar la presencia de variaciones musculares a nivel del codo, que luego pudieron ser probadas, con el estudio anatómico e histológico, como posible causa de atrapamiento y compresión del nervio.

El estudio de la fascia crural, muscular o profunda de la pierna fue muy similar al del antebrazo, observándose la línea hiperecogénica de la misma con el estudio ecográfico. También se observó la estrecha relación de la fascia con la musculatura de la pierna, concretamente con el músculo tibial anterior en el compartimento anterior de la pierna y con la salida del nervio peroneo superficial. Y en el compartimento posterior, se pudo observar la formación, a partir de esta fascia profunda, de un septum de separación de los músculos profundos y superficiales de dicho compartimento a partir del tercio medio de la pierna, tanto en adultos como en el feto. Este septo fijaba y aislaba a los músculos profundos y posteriores de la pierna, haciéndoles más susceptibles de sufrir un síndrome compartimental en ciertas condiciones.

Conclusiones: Estos estudios ecográficos, anatómicos e histológicos en las extremidades superiores e inferiores han permitido observar las estrechas relaciones de la fascia muscular o profunda con algunos músculos y otras estructuras vasculonerviosas, que pueden explicar síndromes compartimentales agudos y crónicos y atrapamientos de nervios periféricos. Y

también incidir en la importancia del uso de la ecografía para aplicaciones tanto clínicas como terapéuticas.

ÍNDICE

Índice	1
Introducción	3
1.- Embriología de las fascias	8
2.- Tejido celular subcutáneo y fascia superficial	11
3.- Fascia muscular o fascia profunda	14
3a.- Fascia antebraquial o fascia profunda del antebrazo	20
3b.- Fascia crural o fascia profunda de la pierna	22
4.- Sonoanatomía del tejido celular subcutáneo, fascia superficial y fascia profunda	24
5.- Nervios periféricos y sonoanatomía de los nervios periféricos	25
6.- Fascia y síndrome compartimental	27
6a.-Síndrome compartimental agudo	27
6b.- Síndrome compartimental crónico	29
7.- Fascia y atrapamiento de nervios periféricos	30
7a.- Atrapamiento del nervio cubital	31
8.- Sonoanatomía del atrapamiento nervioso	34
Hipótesis	37
Objetivos	39
Principales	40
Secundarios	40
Material, métodos y resultados	41
Artículo 1	42
Artículo 2	54
Artículo 3	72
Discusión	91
Conclusiones	110
Bibliografía	113

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La palabra fascia proviene del latín, significa ‘banda’ o vendaje y se cree que es una versión latinizada de la antigua palabra griega “taenia”, que se aplicaba a una variedad de objetos delgados en formas de tiras, incluidos vendajes y cintas. Sin embargo, ya se habían encontrado descripciones de la fascia desde el 2500 antes de Cristo, en los antiguos imperios Egipcio, Romano y Griego, cómo aquellas partes del cuerpo que formaban membranas y tendones no fue hasta al siglo XVI- XVII que la fascia no entra en la terminología médica para expandir su significado a la descripción de las numerosas membranas que protegen y acompañan al cuerpo (1).

Hoy en día, debido al creciente interés por su investigación y siguiendo las descripciones previas de la anatomía macroscópica, se la describe como una amplia gama de tejidos mesenquimales indiferenciados (2). Y desde el 2007, gracias al International Fascia Research Congress, se puede extender la definición de fascia a todos los tejidos conectivos fibrosos, incluidas las aponeurosis, los ligamentos, los tendones, los retináculos, las cápsulas articulares, a las túnicas que cubren los órganos y vasos, al epineuro, meninges y todas las fibras endomisiales e intermusculares de las miofascias (3). También, la ampliación del significado de la palabra fascia también fue extendida dentro de la terminología anatómica (4). Todo ello ha permitido a los investigadores relacionarla desde los tejidos más laxos a aquellos más densos y desde la parte más superficial a aquella más profunda, pudiendo estar formada por una o varias capas (5). Y es que la fascia en su amplia definición acoge a todas las formas de tejido conectivo, aunque varíe su morfología (6). Evidentemente, siendo un tejido tan versátil, su función variará según el órgano que acompañe, pudiendo: compartimentar, separar, permitir el deslizamiento, conectar o transferir fuerzas (3) pero también, según la carga fisiológica en la que se encuentre este tejido, variará sus características histológicas, el número

de niveles o hasta la presencia de grasa o no y además estos cambios podrán ser visibles a nivel morfológico (5). Sin embargo, no siempre la forma o la histología del tejido conectivo es tan clara (5), por ello, para facilitar la comunicación y minimizar la ambigüedad (7) la fascia tomará su nombre basándose en las estructuras más cercanas (3) y se designará su tipología según la función que realice. De esta manera se pueden exponer las siguientes tipologías de fascias (7):

- Tejido conectivo denso: tejido conectivo que contiene fibras próximas, empaquetadas y ordenadas de colágeno (que se encuentran alineadas en muchas direcciones).
- Tejido areolar o tejido conectivo no denso: Tejido conectivo que tiene escasas, irregulares y ordenadas fibras de colágeno.
- Fascia superficial: Capa envolvente debajo de la piel que contiene tejido conectivo denso y areolar y grasa.
- Fascia profunda: La lámina continua mayoritariamente densa, y dispuesta de manera irregular que limita los cambios de forma en las estructuras subyacentes. La fascia profunda se puede continuar con el epimisio y los tabiques intermusculares y también pueden contener capas de tejido conectivo areolar.
- Septum intermuscular: Fino estrato de láminas estrechamente empaquetadas de fibras de manojos de colágeno, que posiblemente tengan algunas direcciones predominantes, organizadas en varios niveles. Normalmente, el septum separa los diferentes grupos musculares, usualmente antagonistas (por ejemplo, flexores y extensores).
- Membrana interósea: Membrana de colágeno similar a los septum intermusculares que une los dos huesos del antebrazo y los dos huesos que forman la pierna.

- Periostio: Membrana de colágeno de dos capas similar en estructura al epimisio que rodea cada hueso y se une íntimamente a él.
- Tracto neurovascular: Corresponde a las fibras de colágeno extramusculares que refuerzan los vasos sanguíneos, linfáticos y nervios. Esta estructura compleja puede ser bastante rígida. El diámetro y probablemente la rigidez de los tractos neurovasculares disminuyen a lo largo de las extremidades desde las partes proximales a las distales. Su rigidez se encuentra relacionada con el ángulo o ángulos de las articulaciones que tienen que cruzar.
- Epimisio: Es una lámina compuesta por varios niveles ordenados de manera irregular por fibras de colágeno que puede contener tejido conectivo denso y areolar.
- Perimisio: Lámina de fibra de colágeno densa, de varias capas y dispuesta irregularmente que envuelve los fascículos musculares. Los fascículos adyacentes comparten una pared del tubo (cómo las células de un panal de abejas).
- Endomisio: Red de fibras de colágeno dispuestas de manera irregular que forman un tubo que envuelve y conecta cada fibra muscular.
- Aponeurosis intra y extramuscular: Estructura con múltiples capas, con haces de colágeno densamente depositados. Las fibras musculares están unidas a las aponeurosis intramusculares por sus uniones miotendinosas.
- Fascia visceral: Tejido conectivo que se encuentra debajo del mesotelio de la serosa, junto a la que rodea a las vísceras (8).

Con todas estas descripciones y centrándonos en la fascia profunda se puede comprender que esta fascia sea un continuo tejido a través del cuerpo (7,9) que conecta distintos elementos estructurales (10), no sólo hablando de las conexiones fasciales entre los músculos, huesos, ligamentos y otras estructuras si no que estas conexiones alcanzan el interior más

profundo de la célula hasta llegar al núcleo celular (6). Y llegados a la célula muscular, y evidentemente a nivel microscópico, se encuentran los microtúbulos que son postes anclados a los filamentos de actina miosina como los cables de sujeción para anclarse en los receptores de integrina. Este citoesqueleto proporciona estructura mecánica y dirección a las reacciones bioquímicas dentro de la célula. De esta manera la célula puede convertir las señales mecánicas externas en reacciones bioquímicas internas (11), y convertiría a la célula viva, en una estructura mecánica con un equilibrio de fuerzas entre microtúbulos que soportan la compresión (12,13) y los haces de actina y miosina que soportan la tensión (11). Este sistema de tenseguridad microscópico de la célula muscular forma parte del músculo y hasta moldea su forma (12,13). Y esta continuidad es la que explica que, a nivel macroscópico, la fascia se pueda llegar a considerar cómo parte del músculo, hueso, cartílago y tejido adiposo y vasos, porque al envolverlos, los relaciona y crea una red interconectada entre ellos (14) muy parecida a la fascia que une la célula con la matriz extracelular (11). Este continuo tejido conectivo y las propiedades intrínsecas de este tejido, posiblemente, permite operar a la fascia mecanosensitivamente a varios niveles del cuerpo (5,7) y encargarse de la tenseguridad de las diferentes estructuras para satisfacer las necesidades mecánicas del cuerpo (10).

Esta fascia profunda está formada por varios tipos de células que la ayudan a realizar su función. La célula principal de la fascia es el fibroblasto que se encarga de sintetizar, organizar y remodelar el colágeno, y dependiendo de la tensión entre la célula y la matriz extracelular se encuentra en un estado de reposo con una baja síntesis de colágeno (15) o aumenta su síntesis de colágeno, la proliferación celular y el tamaño del cuerpo (adoptando una forma laminar) del mismo fibroblasto, si la matriz se encuentra en un estado de alta tensión.

Resumiendo, la fascia ha pasado de ser vista como un residuo intrascendente, que acompaña a órganos “más especializados”, a un órgano que actúa y pone en conexión numerosas

estructuras. Estos hechos han producido que numerosas especialidades del ámbito sanitario, como cirugía, traumatología, fisioterapia, rehabilitación, entre otras, adquieran mayor consideración por esta estructura (3). Y por ello es probable, que al estudiar con mayor profundidad la fascia obtengamos más claves para comprender la acción muscular, el dolor musculoesquelético y otras patologías del tejido conectivo.

1.- EMBRIOLOGÍA DE LA FASCIA

Para comprender mejor las fascias y sus funciones es importante conocer su origen embriológico.

Las fascias como la mayoría del tejido conectivo proviene de la misma capa embriológica del mesodermo (16). El mesodermo, es una de las capas del embrión, originada entre los 15 y 18 días durante la gastrulación (16). Este mesodermo se encarga de originar una gran variedad de células del tejido conectivo que formarán el tejido musco-esquelético (hueso, cartílago, músculo) y sistema cardiovascular (corazón, sangre y vasos sanguíneos) (16,17). Aunque también da lugar a otros tejidos como el tejido linfático y tejido adiposo, al mismo tiempo que participa en la formación de algunos órganos como el sistema urinario, corteza suprarrenal, el bazo, las gónadas, peritoneo, dermis de la piel y músculo liso de los órganos (18).

La aparición del mesodermo en el embrión favorece el desarrollo de las otras capas embriológicas y sus derivados a través de estrategias sofisticadas. De esta manera, permite el movimiento celular, la reproducción, el intercambio de nutrientes y gases, el desarrollo de los sistemas circulatorio y musculoesquelético da soporte a órganos internos y permite también el desarrollo de los sistemas excretor y reproductor (19). Para realizar todas estas funciones especializadas, el mesodermo se dividirá en distintas unidades y de estas unidades es el mesodermo paraxial el responsable de la formación de los músculos de la cabeza, musculoes-

quelético estriado del tronco y extremidades, esqueleto excepto los huesos del cráneo, la dermis de la piel y el tejido conectivo (17,20).

La fascia profunda, la fascia intramuscular y el músculo se originarán en el miotoma (21) una división de somita dentro del mesodermo paraxial (18). Sin embargo, mientras que los huesos y articulaciones del esqueleto axial se originan en el esclerotoma dentro del mesodermo paraxial (18); los huesos y articulaciones que forman el esqueleto apendicular y parte del tejido conectivo, tienen origen en la placa lateral del mesodermo paraxial (22). Respecto a la musculatura, que contribuye a la formación de las extremidades, sigue siendo un tejido derivado del miotoma, de la misma manera que la fascia profunda e intramuscular (23,24).

Hasta hace poco se desconocía cual era el origen de la fascia profunda, incluso se creía, que podía estar formada durante un proceso de muerte celular de las fibras musculares a lo largo de la superficie muscular. Sin embargo, los estudios recientes sobre ella contradicen estas afirmaciones ya que la presencia de macrófagos es muy escasa durante el desarrollo de las fascias y por ello diferentes autores relacionan más su formación con el aumento de células mesenquimatosas en la superficie del músculo (25,26).

De la semana 22 a la 27 de gestación, la fascia se caracteriza por tener una elevada celularidad sin una organización clara, ni la visualización de ningún subnivel (25,27). No será hasta la semana 29 en que la fascia empieza a organizarse, mostrando un tejido conectivo denso y un esbozo de la primera capa. Es a partir de la semana 36, en que la fascia profunda de las extremidades se puede observar de manera diferenciada en 2 a 3 capas de tejido conectivo denso regular y tejido areolar entre medio de dichas capas, aunque las fibras presentan siempre una única dirección. A partir de la semana 38, estas capas celulares ya adquieren diferentes direcciones, transversales y longitudinales. Destaca en este periodo, la capa media que es más prominente por la presencia de paquetes compactos de fibras de colágeno

mientras que las otras capas son mucho más delgadas y con las fibras más dispersas. En la semana 40, la fascia profunda ya adquiere un patrón más organizado, y todas las capas presentan fibras con la misma dirección (25–27). De igual modo, varía la distribución de colágeno en función de la edad del desarrollo del feto. Respecto a la presencia del ácido hialurónico en la fascia profunda se ha comprobado que, en las primeras semanas de desarrollo embrionario, se distribuye de manera más desorganizada cuanto menor sea el tejido conectivo denso e irregular, mientras que a partir de la semana 36, cuando el tejido conjuntivo es más denso y compacto, el ácido hialurónico se presenta de manera más organizada, pero en menor cantidad (25). Respecto a la evolución de la fascia, algunos autores, afirman que depende de las contracciones musculares y de los movimientos articulares del feto igual que el desarrollo del tendón asociado al músculo y los ligamentos (28). Es por ello, que la maduración de la fascia profunda también estará ligada a la actividad del feto, y exactamente a la frecuencia y rango de los movimientos, de forma que cuanto más activo sea el feto mayor será la maduración de esta fascia (25).

Otros estudios muestran la relación de la fascia profunda con las estructuras adyacentes de forma que tanto los capilares sanguíneos como las estructuras nerviosas ya se encuentran presentes en el momento de inicio de proliferación de las células mesenquimatosas en la superficie muscular que dará lugar a dicha fascia. Estos capilares continúan en esta posición, una vez ya se ha formado la fascia profunda y tan solo algunos la cruzan en lugares concretos para alcanzar la fascia superficial o tejido adiposo (27). La aparición de la fascia superficial, con un aspecto, interrumpido o fragmentada, delgado y laxo, no es paralelo al de la fascia profunda y está presente con anterioridad (26). Después de su formación, en la semana 22-23, el tejido adiposo que formará esta fascia da lugar a la capa de tejido conectivo denso irregular que se extiende superficialmente para organizar el tejido adiposo e inferiormente

para organizar el músculo. Semanas más tarde, en la semana 31, el epimisio puede ser visualizado como una estructura fina con menor tejido conectivo denso irregular (27). Igualmente se ha descrito la formación de los tabiques intramusculares, previamente a las 28 semanas en el brazo y la pierna, como tejido conectivo laxo y anterior a la formación de la fascia profunda (29,30), pero es necesaria su presencia para la formación del músculo. A nivel molecular, se conoce que el factor ctf4 estimula la expresión de la cadena de miosina, y así fomenta el desarrollo, maduración y selección del tipo de fibra muscular (29,30). Los fibroblastos parece que también desempeñan un papel activo en la morfogénesis de los músculos, aunque esto solo ha sido demostrado en embriones de ratones y pollos (29). En el humano se cree que se produce de una manera parecida, porque se han encontrado elevados niveles de fibroblastos Tcf4+ en la fascia profunda inmadura que desaparecen con la maduración de la fascia profunda y en el epimisio y perimisio. Es por ello que la fascia profunda, pero más específicamente la fascia intramuscular, es un componente importante en la biogénesis y la morfogénesis en el feto humano (27). Aunque cabe destacar que faltaría mayor conocimiento sobre la ontogenia y embriogénesis de los tejidos (25).

2.- TEJIDO CELULAR SUBCUTÁNEO Y FASCIA SUPERFICIAL

El tejido celular subcutáneo se encuentra inferiormente a la dermis y cubre a la fascia profunda (31).

Este tejido está formado mayoritariamente por tejido adiposo y queda dividido en dos capas por la presencia de una membrana fibrosa de tejido conectivo denso denominada fascia superficial por algunos autores (32). Esta membrana divide al tejido adiposo en el tejido adiposo superficial (TAS) y el tejido adiposo profundo (TAP) (32–34). Sin embargo, también se puede identificar, dentro del tejido adiposo, tejido conectivo laxo a modo de tabiques

fibrosos que lo divide en distintos compartimentos. Estos tabiques, también conocidos como retináculos, se disponen de forma perpendicular a la piel en el TAS, formando los retinaculum septum superficialis o ligamentos de la piel, mientras que, en el TAP, son más delgados y con una disposición más oblicua y se conocen como retinaculum cutis profundus (35). Esto último hace que también difiera el grosor, y forma, en la disposición de los lóbulos adiposos, siendo más circulares en el TAS que en el TAP (32).

Existen diferencias entre la disposición y grosor de la fascia superficial según la región del cuerpo humano, la superficie y el género, con tendencia a ser más prominente en el tronco, en la parte posterior, o en las extremidades donde a medida que es más distal se vuelve más delgada (7,36).

Se atribuyen distintas funciones a la fascia superficial. Una de ellas es debida a su especial arquitectura. De esta forma, en las capas membranosas, el tejido conectivo laxo organiza una red tridimensional en dirección transversal formada por una red de colágeno entretelado y fibras elásticas sueltas, en el interior del tejido adiposo. Esta red formará una especie de encaje en algunas áreas y a diferentes niveles de la fascia con la intención de formar túneles y compartimentos especiales para dar soporte a los vasos linfáticos y venas superficiales y otras estructuras nerviosas (36,37). Incluso algunos autores hablan de ligamentos que sería capaces de modular el calibre de las venas superficiales al producirse la contracción muscular y así, modular el flujo sanguíneo, evitando su dilatación patológica, mientras que la ausencia, fallo o escasez de estas estructuras podrían ocasionar cambios varicosos o su disfunción (38). Esta relación con los vasos, y esta especial arquitectura, ejerce un papel importante en la nutrición y respiración celular (39) ya que distintos estudios han demostrado que en los puntos donde se realiza el movimiento de fluido transintersticial, desde los capilares a los vasos sanguíneos, existe una vía de baja resistencia a través de las fibras del tejido conectivo.

Esto último es de vital importancia ya que la dinámica de estos fluidos podría estar comprometida en las alteraciones del tejido adiposo (40).

Otra de las funciones es que los adipocitos, que están en contacto con la dermis reticular, pueden participar en procesos como el ciclo del folículo piloso (41) la cicatrización de heridas (42), termorregulación (43,44) y la respuesta inmunitaria innata de la piel (45). Además, estos adipocitos estarían también relacionados con las células de la piel que conducen a reacciones cutáneas inflamatorias (44,46), así como en el envejecimiento de la piel (47) y al mismo tiempo tienen la capacidad de transformarse fenotípicamente en miofibroblasto (48). Mientras que el tejido adiposo del TAP tendría la función de depósito metabólico (49).

Otra función debido a sus componentes de fibras elásticas y colágenas es el movimiento entre la piel y estructuras subyacentes como la fascia profunda, la adaptabilidad, el deslizamiento (50), adquirir de nuevo la posición original de la piel cuando las fuerzas han desaparecido, así como proteger la hipodermis de lesiones físicas (51) .

Por último, a la fascia superficial le corresponde encerrar, sostener, dar forma a la grasa de ciertas regiones del cuerpo, reforzando la piel sobre los tejidos subyacentes. Para ello utilizará las bandas fibrosas que se extienden a la piel, tejido adiposo y fascia profunda. La existencia de la fascia superficial provee mayor protección a las estructuras musculoesqueléticas en aquellas superficies óseas pronunciadas y permite recubrir los depósitos de grasa localizados para que soporten mejor la posición y el peso, en gente obesa o mayor, protegiendo la caída de los tejidos (52).

Respecto a su función reguladora de la temperatura, diversos autores lo atribuyen al pánículo adiposo que actúa como aislante térmico para compensar la escasez de vello corporal (53). Esto es debido a que es una capa muy inervada por el sistema nervioso autónomo, con un porcentaje entre 33,82 y 40% de fibras simpáticas postganglionares que le permiten se-

guramente tener una función vasoconstrictora (54) y contribuir a la termorregulación (55). El tanto por ciento de las fibras simpáticas restantes tendría un rol mecanoreceptor por las fibras amielínicas tipo C. Estas fibras inervan la fascia superficial de manera bidireccional (56) de manera que la fascia podría modularse mecano-receptivamente frente a estímulos mecánicos (55) y la mayor actividad simpática induciría a la contracción de los miofibroblastos por la expresión TGF- β 1 causando mayor rigidez del tono fascia subcutáneo (57,58).

3.- LA FASCIA MUSCULAR O FASCIA PROFUNDA

Inferiormente a la fascia superficial o tejido subcutáneo se haya la fascia muscular o fascia profunda. La fascia profunda es una membrana fibrosa formada por tejido conectivo denso irregular, que forma una red intrincada que envuelve y separa los músculos de las extremidades y tronco, pero también forma vainas para los nervios y vasos sanguíneos, refuerza los ligamentos alrededor de las articulaciones y mantiene las estructuras reunidas en una firme estructura compacta (32). Para poder envolver a todas estas estructuras la fascia cambia de características de forma que acondiciona su composición según la estructura que acompaña (2).

Algunos autores llaman a la fascia profunda fascia aponeurótica y al epimisio fascia epimisial (59,60). Y es que, a pesar de todos los esfuerzos, algunos términos siguen generando cierto debate (61–65). En cualquier caso, la fascia profunda forma vainas fibrosas bien definidas que recubren y mantienen un grupo de músculos o que sirven para la inserción de diferentes músculos. Esta es la fascia que se encuentra en las extremidades, la fascia toracolumbar y la vaina del recto del abdomen. Mientras que el epimisio es una vaina de tejido conectivo que rodea a un músculo y que en algunos casos se conecta con el periostio de los huesos a través de los tendones o septum intermusculares (60).

Entre medio de los músculos y las fibras musculares se encuentra el tejido conectivo laxo areolar. El tejido que envuelve a la fibra muscular se denomina endomisio, varias fibras musculares forman un fascículo y este envuelto por el perimisio y el epimisio rodea a todos los fascículos musculares (2). El revestimiento que ofrece este tejido es de esencial importancia, porque promueve el movimiento independiente de los músculos y sus fibras musculares (2). Otro factor que ayuda a lograr esta independencia es el ácido hialurónico (66). El ácido hialurónico se encuentra en el tejido conectivo laxo, entre epimisio y fascia profunda, y también en el endomisio, perimisio, epimisio, fascia profunda y epidermis (67). Este tejido hialurónico actúa como lubricante entre las diferentes superficies (67), permite la contracción aislada de varias unidades motoras y el deslizamiento de los diferentes niveles de la fascia y contribuye al deslizamiento de los músculos y tendones (66).

Histológicamente, la fascia profunda está formada, como ya se ha comentado anteriormente, por tejido conectivo denso irregular (2). La fascia profunda presenta 2 a 3 capas de fibras de colágeno paralelas, y cada capa con un grosor de 277 μm . Separando las diferentes capas se encuentra una fina capa de tejido conectivo laxo de 43 μm (68), que es un tejido altamente especializado (2). En las extremidades la fascia tiene un grosor aproximado de 1 mm (590-1453 μm), siendo más gruesa en las extremidades inferiores, concretamente en la pierna con 650 μm y en la parte posterior de la misma. En las extremidades superiores, la fascia antebraquial, en el antebrazo, es más fina que la fascia braquial, pero presenta dos refuerzos, el lacertus fibrosus y el retináculo de la muñeca (69).

Las células que forman la fascia profunda son: fibroblastos, fasciocytes, miofibroblastos y telocytes (70) y según algunos autores también condroblastos (2). En este tejido la célula dominante es el fibroblasto (71) aunque esto puede variar según el nivel de tensión al que sea sometido el fibroblasto (58). El fibroblasto ofrece soporte y estructura al sistema fascial,

y se encarga de mantener la función homeostática en los tejidos, crear depósito, mantenimiento y remodelación de la matriz extracelular (71). Esto es debido a que el fibroblasto produce el componente fibroso de la matriz extracelular de la fascia (colágeno y fibras elásticas), este hecho permite regular celularmente la fuerza de transmisión del tejido fascial (9). Para producir este componente fibroso, el fibroblasto sintetiza colágeno tipo I y tipo III, que se encuentran profundamente relacionados con el tejido conectivo. El colágeno tipo I es el más abundante en el cuerpo humano (72) y se caracteriza por ser fibras fuertes y rígidas (73). Mientras que el colágeno tipo III forma fibras alrededor del colágeno tipo I (72), y sus fibras son fibras inmaduras, débiles y elásticas (74). Ambos son necesarios para otorgar las propiedades mecánicas rigidez y dureza a la matriz extracelular (75). En la espalda y las extremidades el número de fibras de colágeno empaquetadas es mucho mayor y eso hace que la fascia sea especialmente gruesa (2).

El miofibroblasto, en cambio, aparece cuando la fascia está sujeta a mayor cantidad de estrés. El aumento de la carga mecánica en el fibroblasto hace que se transforme en miofibroblasto (76). El miofibroblasto es un fenotipo de fibroblastos con características de una célula muscular lisa (77) y su papel es mediante su contracción regular dando la firmeza de la fascia (76) cuando es necesario a nivel fisiológico(77). La contracción de los miofibroblastos influye también no solo la firmeza de la fascia, sino en la coordinación motoneuronal y la dinámica musculoesquelética (78). Aunque también pueden causar contracturas fibróticas que afecten a la fascia cuando su proliferación es anormal (79). Cuando la fascia no sólo se ve subyugada a algo más que estrés sino también elevados niveles de compresión (80,81), como en la fascia plantar o algunos retináculos, las células predominantes serán los condroblastos. Los condroblastos son células con un fenotipo condrocítico y el tejido que forman puede considerarse como fibrocartílago (2).

Las células encargadas del mantenimiento de la matriz extracelular son los fasciocitos y fibroblastos. Ambas células son las encargadas de fabricar el componente extracelular (70). En una fascia normal, el 30% son fibroblastos o fasciocitos, aunque este porcentaje puede variar dependiendo de los estímulos que llegan a la fascia (70). Los fasciocitos: son racimos de células redondeadas a lo largo de la superficie de cada capa fascial y su función es sintetizar ácido hialurónico (HA) (78). Los fasciocitos son células similares a los fibroblastos. Los fibroblastos al formar el componente fibroso (colágeno y fibras elásticas) juegan un rol regulando la fuerza y transmisión a distancia. Los fasciocitos producen ácido hialurónico, que permite deslizar las diferentes capas fasciales (70).

Por último, dentro de las células del tejido fascial se encuentran los telocitos. Los telocitos son células del tejido conectivo con extensiones denominadas telopodos (82,83). Estos se encuentran en contacto unos con los otros para formar un sistema de comunicación alternativo en la matriz extracelular (84). Aunque falta mayor investigación sobre su distribución, función y su rol en el dolor miofascial y los desórdenes fasciales. Se cree que estas células participan en procesos de reparación, regeneración y remodelación celular, en el control inmunitario y la comunicación mediante enlaces o vesículas celulares (85).

Todas estas células se encuentran inmersas en el abundante componente extracelular, una matriz dinámica y tridimensional compuesta por colágeno, proteoglicanos/glicosaminoanglicanos, elastina, fibronectina, laminillas, y algunas glicoproteínas. Juntos, todos estos componentes forman una compleja malla en la que las células residen, se comunican y participan en varios procesos celulares como el crecimiento, diferenciación y migración (86). En la matriz extracelular se encuentran dos tipos de moléculas principales. Estas son las proteínas fibrosas y el componente acuoso. Cada una de ellas con diferentes características y funciones (77).

El componente fibroso de la fascia profunda se debe a las fibras de colágeno (especialmente colágeno tipo I y III), pero también contiene fibras elásticas (elastina y fibrina) que compensan el colágeno existente (87). Este colágeno se distribuye de manera ordenada, con fibras anelásticas de colágeno, que en las extremidades forman de dos a tres capas separadas con un ángulo de 78° . Las fibras de cada capa son paralelas entre ellas y están colocadas en una dirección, pero la orientación de esta dirección cambia de capa en capa (88). Esta colocación en las fibras de colágeno es fundamental para transmitir la fuerza muscular, conectar los diferentes segmentos y contener las estructuras (89). La orientación en un ángulo de 78° entre las fibras de colágeno le permite la adaptabilidad de la fascia (88), pero eso no es suficiente, también se necesita la cooperación de los haces de colágeno y las fibras elásticas para permitir a la fascia adaptarse al estiramiento y distensión para permitir distribuir el estrés de la estructura y mantener la resistencia del tejido (87). Los análisis histológicos en la fascia profunda de las extremidades superiores e inferiores clasificaron el volumen de colágeno en un 18% y las fibras elásticas menos de un 1% (88). Esto permite transmitir perfectamente las tensiones creadas por los músculos a grandes distancias (50). Mientras que, las fibras elásticas que permitirían al músculo adaptarse a las fuerzas y volver a la posición inicial se encuentran en el tejido conectivo laxo entre las láminas de tejido conectivo denso (37).

El componente acuoso de la matriz extracelular se encuentra retenida por glicosaminoglicanos, en el que el ácido hialurónico es el más presente, unidos covalentemente a proteínas formando proteoglicanos y glucoproteínas. El ácido hialurónico se encuentra en mayor proporción en la fascia profunda ($43 \mu\text{m}$) que el epimisio ($6 \mu\text{m}$), aumentando su contenido en los retináculos ($90,4 \mu\text{m}$) (90). Estas variaciones en el contenido de ácido hialurónico corresponden a las diversas funciones de deslizamiento de las fascias, la fascia profunda necesita libertad para deslizarse sobre los músculos, mientras que el epimisio es una capa fibrosa

adherida a los músculos subyacentes que precisa menos deslizamiento (91), y los retináculos es parte de la fascia profunda que rodean las articulaciones y fija los tendones (92).

La presencia de los receptores intrafasciales en la fascia profunda permite a la fascia percibir y adaptarse a los cambios (93). Estos receptores son receptores sensitivos: husos musculares (en el epimisio), órganos tendinosos de Golgi, corpúsculos de Pacini y Ruffini (en la fascia profunda) y extensas terminaciones nerviosas sueltas (59). Los corpúsculos de Pacini y Ruffini como mecano-receptores ayudan a una adaptación rápida y lenta y juegan un papel en la propiocepción de la fascia profunda (70). Además, también presentan terminaciones encargadas de la nocicepción. Las fibras-C amielínicas son más numerosas en la fascia profunda que en los músculos y tejido subcutáneo (94), y pueden generar un rol importante en la generación de síntomas dolorosos (95). Aunque, contrariamente, la fascia tiene receptores endocannabinoides (96) capaces de modular el dolor y a través de su transmisión al sistema nervioso central (97), este sistema también puede regular la fibrosis e inflamación activando la actividad antifibrótica (98). Cabe destacar que el 40% de la inervación del tejido fascial es simpática, y por ello en la fascia profunda puede existir una vasoconstricción de su vascularización (99).

Pero las funciones de la fascia no acaban aquí, la fascia también interactúa con los músculos y los huesos, a los que es especialmente útil. Su carácter inextensible permite contener y separar los huesos, en el antebrazo y pierna. Mientras que, los septum intermusculares aíslan a los diferentes grupos musculares en espacios bien definidos llamados compartimientos. Estos compartimientos se encuentran en cada segmento de las extremidades separando los músculos en grupos funcionales con su irrigación e inervación. Estos compartimientos se nombran de acuerdo con la posición anatómica y la acción de los músculos que contienen (2). La fascia profunda integra estos compartimientos y transmite la tensión entre ellos

(100). Y pone en conexión a los músculos agonistas y antagonistas unidos mecánicamente por la misma fascia (101). Los septum intermusculares se encuentran normalmente anclados al periostio, igual que la fascia profunda que los acompaña (100). La fascia en los compartimientos también ejerce un rol como ecto-esqueleto permitiendo el anclaje de músculos como si se tratase de un hueso del esqueleto (102). Esta fijación permite a la fascia profunda ayudar en el retorno venoso. Esto se produce cuando los músculos se contraen contra una fascia dura, gruesa y resistente, de forma que las venas de paredes delgadas y los vasos linfáticos se contraen y sus válvulas unidireccionales aseguran que la sangre y la linfa se dirijan hacia el corazón (2,101). Esto podría explicar una de las razones por las que la fascia profunda es más prominente en las extremidades inferiores que en las extremidades superiores (2).

3a.- FASCIA ANTEBRAQUIAL O FASCIA PROFUNDA DEL ANTEBRAZO

La fascia profunda de la extremidad superior forma una banda continua desde la axila, hasta llegar a la fascia o aponeurosis palmar (103). La fascia antebraquial o la fascia profunda del antebrazo es una continuación de la fascia braquial o fascia profunda del brazo hasta la fascia palmar (103). A nivel del antebrazo, esta fascia envuelve a los músculos del compartimiento anterior, posterior y lateral. Y además, esta fascia crea expansiones profundas y perpendiculares que ayudan a originar a músculos superficiales del compartimientos anterior y posterior del antebrazo, a la vez que los separa y aísla a un músculo localizado entre el brazo y el antebrazo que es el músculo ancóneo (104).

A nivel proximal la fascia profunda del antebrazo, se anclará tanto en el epicóndilo medial como lateral del húmero. Sin embargo, desde el epicóndilo lateral, como se ha comentado, esta fascia forma tabiques que separan a los músculos extensor de los dedos (ED), extensor del 5º dedo (EQD) y extensor cubital del carpo (ECC), siendo visible ecográficamente. En el

epicóndilo medial, sucede lo mismo con el origen de los músculos: pronador redondo (PR), flexor radial del carpo (FRC), palmar largo (PL) (si existe) y flexor cubital del carpo (FCC) (104). A nivel distal la fascia se fija en la apófisis estiloides del radio y del cúbito. Distalmente, la fascia continúa aislando al ECC, FRC, PL (si existe) y FCC. Esta división está presente en estos músculos desde su origen hasta que el ECC llega al 6º compartimento del retináculo extensor, en el FRC y FCC, la división es a través de un tabique más delgado, pero alcanza al retináculo flexor y el PL en caso de encontrarse presente, llega a la aponeurosis palmar. A nivel del codo, el músculo ancóneo quedará totalmente aislado por el compartimento que la fascia antebraquial creará para el músculo desde el cúbito hasta el borde medial del músculo tríceps braquial donde se continua con la fascia braquial o profunda del brazo (104). En el caso de los músculos ED y EQD se observa que se encuentran separados proximalmente por un septum en el 91,18% de los casos, aunque este desaparece al llegar al tercio distal del antebrazo (104).

Otra de las funciones de la fascia profunda en el antebrazo es dar origen a diferentes músculos flexores y extensores, como una aponeurosis de origen de los mismos. La longitud de origen en dicha aponeurosis es diferente para cada músculo (104).

A nivel histológico, esta fascia presenta de 2 a 3 capas de tejido conectivo que cambia de disposición y grosor según al músculo que cubre (104,105).

Otros autores también han descrito la composición de la fascia profunda, como una fascia formada por múltiples capas de fibras de colágeno empaquetadas, de grosor y trayecto variables a causa de las ondulaciones de la fascia. Los paquetes de colágeno son paralelos unos a otros y varían de alineación en las distintas capas. Los fibroblastos se encuentran entre estos paquetes de colágeno al igual que las fibras elásticas, cortas y ramificadas distribuidas, estas últimas como una malla irregular (105). Estas capas se encontraban divididas en varios

niveles separadas por láminas de tejido conectivo laxo en este caso con la infiltración de algunos adipocitos. En algunas partes, las láminas de tejido conectivo denso irregular se conectan con el epimisio de los músculos (105).

Toda la fascia antebraquial dispone de numerosos vasos sanguíneos que siguen el camino tortuoso de las fibras de colágeno. Al igual que las fibras nerviosas, también muy numerosas en este tejido. Este recorrido contribuye a distinguir las terminaciones nerviosas conectadas al colágeno y otras rodeadas de tejido conectivo laxo, como otras terminaciones: Corpúsculos de Ruffini, Pacinni y Golgi (105).

3b.- FASCIA CRURAL O FASCIA PROFUNDA DE LA PIERNA

El estudio anatómico muestra la fascia crural, o fascia profunda de la pierna, continua con la fascia del muslo, desde la articulación de la rodilla hasta la articulación del tobillo. Esta fascia rodea a los músculos de la pierna creando tres compartimientos: el anterior, el posterior y el lateral (106), aunque algunos autores describieron otros compartimientos para el tibial posterior (107–109) y otro compartimiento que separaría la musculatura profunda de la superficial en la parte posterior de la pierna (110).

La fascia en el compartimento posterior aísla a los músculos posteriores, sin un origen directo en la misma del músculo gastrocnemio y se divide para compartimentar a los músculos profundos posteriores de la pierna, de manera que aísla al flexor largo de los dedos (FLD), tibial posterior (TP) y flexor largo del dedo gordo (FLDG) (109). En el compartimento lateral no se encuentra ningún septum que separe los músculos laterales, pero sí que se observa una relación importante del nervio peroneo superficial (NPS) con dicha fascia cuando la atraviesa para hacerse subcutáneo, aunque este patrón de salida es muy variable, de manera que a veces sale directamente y otras tras un trayecto dentro de un túnel realizado por la misma fascia crural (111).

La fascia crural, a nivel distal, y por el dorso de la pierna o cara anterior de la misma, forma un engrosamiento correspondiente al retináculo extensor que aísla los tendones de los músculos tibial anterior (TA), extensor largo de los dedos (EDL), extensor largo del dedo gordo (ELDG), de medial a lateral; por la cara lateral se fija al maléolo lateral y posteriormente forma el retináculo lateral que fija los tendones de los músculos peroneo largo (PL) y peroneo corto (PC), y por la cara posterior se fija al maléolo medial y posteriormente a dicho maléolo, la fascia forma el retináculo flexor, que tabica a los tendones de los músculos tibial posterior (TP) flexor largo de los dedos (FLD), paquete vascular tibial posterior y nervio tibial posterior y tendón del músculo flexor largo del dedo gordo (FLDG) (112).

A nivel histológico la fascia crural tiene un grosor de $924 \pm 220 \mu\text{m}$ y está formada por 3 capas distintas de $277.6 \pm 86.1 \mu\text{m}$ (113) cada una de ellas.

Estas diferentes capas están compuestas por paquetes de colágeno paralelos. Cada nivel se encuentra separado del adyacente por una fina lámina de tejido conectivo laxo de $43 \pm 12 \mu\text{m}$. Las fibras de colágeno se encuentran empaquetadas, con una orientación de $80-90^\circ$ (88,113). Las fibras elásticas también se encontrarán presentes en la fascia superficial en la fascia crural y en la profunda, aunque únicamente en el tejido conectivo laxo.

La fascia es una estructura muy inervada e irrigada, tal como se ha comentado y la fascia crural, al igual que otras fascias del organismo, dispone de una rica red vascular aunque algo tortuosa. Así mismo está inervada por fibras nerviosas, también numerosas que se encuentran distribuidas alrededor de los vasos sanguíneos en el tejido conectivo denso de la fascia, sobre todo en el nivel medio de esta (88,113) .

4.- SONOANATOMÍA DEL TEJIDO CELULAR SUBCUTÁNEO, FASCIA SUPERFICIAL Y FASCIA PROFUNDA

El estudio del tejido celular subcutáneo, y de la fascia tanto superficial como profunda a través de la ecografía se ha incrementado durante esta última década.

El estudio ecográfico se ha centrado en varios aspectos siendo uno de ellos el espesor de la fascia superficial y su estudio se ha realizado en distintas partes del cuerpo humano como el tronco (114), el muslo (69) y la extremidad superior (115).

El creciente interés es debido al estudio de las arterias perforantes que permiten realizar colgajos preoperatorios, y en todos ellos la aplicación de la ecografía y sobre todo con la aplicación del doppler son de gran utilidad (116). Pero en otros casos porque ayuda a conocer la compartimentación de este tejido y sus implicaciones como por ejemplo en la cicatrización hipertrófica, las infecciones en el sitio quirúrgico o incluso la necrosis grasa, ya que todo ello podría prevenirse mediante un mayor conocimiento de ésta, de su alineación y su espesor que vendría favorecido con la aplicación de la ecografía (114).

Estos estudios llegan a la conclusión de que la fascia superficial, tiende a ser más gruesa en áreas de alta tensión como la parte superior del tronco lo que implicaría un abordaje quirúrgico específico para las suturas subcutáneas posteriores y la minimización de posibles complicaciones (114). O bien en el caso del estudio ecográfico de la fascia superficial en la extremidad superior con un espesor más grueso en la región posterior del brazo que en el antebrazo pueda ayudar a mejorar el diagnóstico de disfunción fascial (115). Y la estimación del grosor de la membrana fibrosa que forma la fascia superficial en el antebrazo la sitúan en $0,40 \pm 0,4\text{mm}$, siendo igual en la región anterior que en la posterior del antebrazo (115)

Inferior al tejido celular subcutáneo y fascia superficial, localizamos ecográficamente la fascia muscular o profunda que siempre aparece como una línea bien diferenciada, continua y

ecogénica, (104). Esta fascia profunda también ha sido medida en distintos puntos y presenta un grosor variable según la zona topográfica (104,117).

Esta fascia profunda tiene un grosor medio de $0,71 \pm 0,2$ mm en la región posterior del antebrazo y $0,68 \pm 0,2$ mm en la región anterior del brazo (117). Otros estudios la describen como una línea ecoica y profunda que forme extensiones perpendiculares a modo de septums para la musculatura superficial del brazo. Se puede ver así de manera hiperecoica, el septum entre el ECC y EQD, que contenía al ECC a lo largo de la longitud del antebrazo, el septum entre el EQD y ED como una línea discontinua hiperecoica y algunas veces hipoecoica en algunos segmentos. Y en el músculo ancóneo se observa como está rodeado por una línea hiperecoica que lo aísla desde el borde lateral del tendón del músculo tríceps braquial al borde lateral del olecranon. En el compartimiento anterior del antebrazo la fascia se presenta como una línea ecoica con origen en el epicóndilo medial, que rodea el compartimiento y también forma septums que se observan como líneas perpendiculares intermusculares hiperecogénicas entre los músculos FCC y al FRC y al PL (104).

5.- NERVIOS PERIFÉRICOS Y SONOANATOMÍA DE LOS NERVIOS PERIFÉRICOS

Los nervios que inervan las extremidades superiores e inferiores del cuerpo humano están incluidos dentro del sistema nervioso periférico, que incluye los nervios espinales para inervar tronco y extremidades y los nervios craneales para inervar cabeza y cuello. Estos nervios espinales, que están formados por la unión de las raíces anteriores o motoras y las raíces posteriores o sensitivas provenientes de la médula espinal, al salir del agujero intervertebral se dividen en la división anterior y la división posterior del nervio espinal, y ambas divisiones con fibras sensitivas y motoras y vegetativas simpáticas. De éstas, son las divisiones anteriores de los nervios espinales, las que forman plexos nerviosos y éstos son los

responsables de formar los nervios terminales para la innervación motora y sensitiva de las extremidades superiores e inferiores (118).

Histológicamente, los nervios espinales están formados por fibras nerviosas o axones algunos rodeados por las células de sostén o células de Schwann que le confieren la capa de mielina. Cada axón está rodeado de una capa de tejido conectivo laxo que se denomina endoneuro. Un grupo de axones se rodea de tejido conectivo y forma un fascículo que está rodeado por tejido conectivo especializado llamado perineuro, mientras que el epineuro, tejido conectivo denso, forma la capa más externa que rodea a todos los fascículos nerviosos y forma el nervio periférico (119).

Este epineuro es mayor en los nervios multifasciculares y en regiones donde el nervio está en relación con las articulaciones o cuando las atraviesa. Este engrosamiento del tejido conectivo parece proporcionar mayor almohadillado al nervio y por tanto más resistencia a las lesiones por compresión. Por fuera, la capa más externa del epineuro se continua con el mesoneuro, formado por tejido areolar laxo y este mesoneuro proporciona la irrigación sanguínea al nervio y facilita el movimiento del mismo sin que los vasos experimenten tracción durante el movimiento de la articulación (120).

La arquitectura de estos nervios terminales, con su disposición fascicular, le confieren un patrón similar a cables, sobre todo a nivel más distal, y ello facilita su reconocimiento ecográfico. Sin embargo, también el avance y la mejora del rendimiento de los aparatos de ecografía ha hecho posible reconocer detalles anatómicos apenas susceptibles con resonancia magnética computarizada (RMC) y han ayudado a detectar una amplia gama de patologías que afectan a los nervios. Además, al ser una técnica barata, no invasiva, con gran rapidez en los resultados, así como tener la capacidad de explorar segmentos largos de nervios en un único estudio y de forma tanto estática como dinámica en tiempo real ha hecho que sea una

técnica de elección sobre el estudio con RMC. Por ello, de estas dos técnicas la ecografía tiene más ventajas sobre la resonancia porque permite un estudio rápido y además dinámico, además de la comparación inmediata con las estructuras contralaterales (121,122).

No obstante, también requiere un gran conocimiento de los detalles anatómicos para poder correlacionarlos con los hallazgos ecográficos (120).

El aspecto ecográfico de los nervios es bastante uniforme y refleja la arquitectura histológica descrita. Los nervios pueden ser examinados con ecografía en el eje corto y en el eje largo durante todo su trayecto, aunque es más habitual examinarlos en el eje corto (123). En este eje, la ecografía muestra los nervios como un conjunto de estructuras de forma redonda, oval, hipoecogénicas, correspondiente a los fascículos nerviosos que discurren longitudinalmente en el nervio que están en un fondo hiperecogénico, correspondientes al perineuro interfascicular, y rodeado todo el nervio por una capa hiperecogénica que corresponde al epineuro, cuya imagen lo comparan algunos autores a un panal de abeja (124).

En el eje largo los nervios muestran unas estructuras elongadas, con múltiples líneas paralelas, hipoecogénicas, que corresponden a los axones separadas por bandas hiperecogénicas correspondiendo al perineuro. Los límites externos de los nervios son generalmente poco claros, con una imagen hiperecogénica similar a los tejidos conectivos que lo envuelven como el epineuro externo, el mesoneuro y los espacios conectivos laxos, que contienen grasa (120). Esta estructura en conjunto da una imagen fascicular como un cable de la luz. Esta imagen fascicular, a diferencia de otras, no suele dar anisotropía (120).

6.- FASCIA Y SÍNDROME COMPARTIMENTAL

6a.-Síndrome compartimental agudo

El síndrome compartimental agudo se produce por la inflamación, sangrado o edema en un compartimiento muscular cerrado rodeado por la fascia profunda o el hueso. La inextensibilidad del vendaje fascial sumado al incremento de la presión muscular conlleva a disminuir o detener la perfusión de los tejidos, y esto deriva en anoxia celular y daño tisular (125,126). La isquemia producida por este síndrome es un círculo que se perpetua entre edema, isquemia y presión dentro del compartimiento (127). En el que el aumento de la presión sanguínea local y el edema (127) aumentarán la permeabilidad de los vasos sanguíneos (128) y la presión local intravenosa (129). Subsiguientemente, conlleva a la disminución de la perfusión local y del gradiente de presión intravenosa sumado a un retorno venoso y drenaje linfático insuficientes para compensar la subida de presión, perpetuando el edema y la presión del compartimiento (129,130). Cuando la presión del compartimiento alcanza la presión diastólica cesa la perfusión de los tejidos (131). Los músculos son capaces de tolerar la isquemia durante 4 horas con secuelas limitadas, pero si se sobrepasan las 8 horas los daños musculares pueden resultar irreversibles (132). En los nervios la isquemia durante 1 hora puede conllevar a neuropraxia reversible, la axonotmesis ocurre partir de las 4 horas y más allá de las 6 horas empiezan a ocurrir cambios irreversibles en el nervio (133). Es por ello, que las guías de práctica clínica de la Asociación Británica de Ortopedia (BOAST 10) en mayo de 2014 recomendaron realizar cirugía de emergencia ante un síndrome compartimental agudo (134). El tratamiento consiste en la realización de la fasciotomía, que permite normalizar el flujo sanguíneo capilar y restaurar las presiones fisiológicas (135). Si el síndrome compartimental no se trata en un tiempo precoz, generalmente conlleva necrosis, amputación de las extremidades, y puede hasta conllevar fallo renal y muerte (125).

El síndrome compartimental agudo puede aparecer en cualquier parte del cuerpo que contenga compartimentos miofasciales como la extremidad superior, muslo, abdomen, pie, y

glúteos (136). Pero es mucho más común en la pierna y el antebrazo por la gran masa muscular del área y la inelasticidad de la fascia (137). En síndrome compartimental en el antebrazo se encuentra asociado a fracturas (138) sobretodo si son fracturas simultáneas (139) con translación (140) o asociadas a lesión arterial (141), sobredosis de narcóticos y las infiltraciones intravenosas (138). En la pierna el síndrome compartimental es normalmente causado por fracturas en la rodilla, dislocaciones y fracturas tibiales (142) aunque también puede ser causado por lesión en los tejidos blandos (143).

6b.- Síndrome compartimental crónico:

Se define el síndrome compartimental crónico cómo el incremento de la presión sobre los vasos sanguíneos y nervios de un compartimiento específico debido a la realización de ejercicio físico y (136,144) y se resuelve al cesar la actividad (145). El síndrome compartimental crónico puede también causar otros síntomas cómo: dolor intenso, sensación de quemadura (145,146). Y se diferencia del síndrome compartimental agudo porque, aunque los dos incluyen la disminución del flujo sanguíneo a través de los capilares intracompartimentales (isquemia capilar), este se conserva en las arterias y venas de mayor calibre (136).

En el antebrazo el síndrome compartimental es una condición poco común en la población general. Normalmente ocurre en motoristas y algunas veces en personas cómo músicos, escaladores, ciclistas de montaña y windsurf (147–150). Esto es debido a la fuerte sujeción en el agarre de la mano que se ha de hacer en estas actividades. El agarre de la mano aplicado de manera repetitiva e intermitente produce de manera brusca: presiones, frenados y tirones, sobre la musculatura del antebrazo (151). El síndrome característico es dolor después del comienzo de la actividad repetitiva que después de unos minutos obliga al paciente a parar (152). Si los síntomas son persistentes después del tratamiento conservador (estira-

mientos, calentamiento, corrección de la postura de conducción), la única opción para aliviar los síntomas es limitar el esfuerzo. Si no se quiere limitar el esfuerzo la única solución es la intervención quirúrgica. Esta se puede realizar mediante cirugía abierta (153–157) o endoscopia (147,148).

Suele afectar a atletas competitivos o personal militar entre los 18 y 25 años, independiente del tipo de ejercicio a realizar, puede suceder tanto en atletas de sprint como en corredores de larga distancia, y respecto al género, afecta hombres y mujeres por igual. Pero es debido a la repetición continua de una misma actividad (158,159). Se ha asociado el síndrome compartimental a personas que desde el nacimiento muestran un elevado tono muscular y en otras ocasiones aquellas que desarrollan músculos hipertrofiados como resultados de actividades de ejercicio repetitivas (148). Esto es debido, a que durante el momento de ejercicio físico el volumen los músculos se expanden un 20%, el flujo capilar aumenta al igual que la retención del líquido extracelular (148). Es por ello que en un estudio recientemente realizado con RMC se ha descubierto que el aumento del contenido en fluido en el compartimiento sería la causa que más compromete la función de los músculos o nervios (149).

El síndrome compartimental en la pierna tiene tres localizaciones diferentes (150). En la mayoría de los individuos el síndrome afecta al compartimento anterior, pero también puede ser posterior o aparecer en el compartimento lateral. Aunque en la práctica diaria también hay pacientes que presentan el síndrome compartimental en los tres compartimientos (151).

7.- FASCIA Y ATRAPAMIENTO DEL NERVIO PERIFÉRICO

Los nervios periféricos son susceptibles de presentar un síndrome de atrapamiento o compresión nerviosa y esta patología suele ser muy frecuente y el resultado de una irritación

mecánica del nervio periférico por compresión crónica o dinámica de las estructuras anatómicas que le rodean (160). Las causas más frecuentes son: el paso del nervio por un trayecto anatómico estrecho, como canales o túneles osteofibrosos, musculares y aponeuróticos (161), los puntos donde el nervio se hace superficial y atraviesa la fascia profunda para llegar a la fascia superficial haciéndose subcutáneo (162,163), causas patológicas como alteraciones morfológicas que conlleven fibrosis, esclerosis, adherencias (164), o secuelas de traumatismos que lesionen el nervio (165).

Todas estas condiciones pueden llevar a una fricción del nervio durante su deslizamiento con las estructuras anatómicas colindantes, pudiendo generar cambios locales en la permeabilidad vascular, formación de edema y un deterioro del transporte axonal (160).

En las neuropatías por atrapamiento los síntomas que presentan son variados, dependiendo del grado y del tiempo de la compresión. La clínica va desde alteraciones sensitivas como parestesia o dolor hasta la falta de función motora (166,167). El diagnóstico se realiza por la clínica y la exploración del paciente, pero también son necesarias otras pruebas de radiodiagnóstico que ayuden a confirmar la compresión del nervio afectado (168).

7a.- Atrapamiento del nervio cubital

De todas las neuropatías de la extremidad superior la neuropatía más frecuente es la del nervio mediano, seguida en frecuencia de la del nervio cubital.

El lugar de compresión más frecuente del nervio cubital corresponde al túnel cubital del codo, entre el epicóndilo medial del húmero y el olécranon del cúbito y también, aunque con menor frecuencia en el canal de Guyon en la muñeca (167,169). Sin embargo, este nervio durante su recorrido ha de atravesar el tabique intermuscular medial del brazo y los orígenes del músculo flexor cubital del carpo que por su disposición anatómica pueden ser puntos

potenciales de compresión. Así mismo existen variaciones anatómicas, como músculos accesorios en el codo, que, aunque pueden pasar desapercibidas clínicamente, pueden influir en el nervio y dar lugar a una compresión del mismo (168).

El nervio cubital es la rama terminal desde el fascículo medial del plexo braquial (C8, T1). Al inicio de su recorrido transcurre medial a la arteria braquial, en el compartimento anterior del brazo, hasta llegar al tercio medio del mismo. El nervio mediano, cubital y radial corresponden a las ramas terminales de plexo braquial que alcanzan la parte más distal de la extremidad superior. Los tres nervios se relacionan primero con la arteria axilar que continua como arteria braquial en el brazo, y mientras el nervio mediano acompaña a dicha arteria durante todo su trayecto en el brazo, los otros dos nervios se separan y siguen su recorrido junto con la arteria colateral cubital superior del brazo, el nervio cubital y con la arteria braquial profunda, el nervio radial, ambas ramas procedentes de la arteria braquial (170).

Este nervio cubital, junto con su arteria, atraviesa el tabique intermuscular medial, en el tercio medio del brazo, pasando del compartimento anterior del brazo al compartimento posterior (170). Este tabique es una banda fibrosa que tiene su origen en la fascia profunda del brazo o fascia braquial y se une con el tendón coracobraquial distal en la diáfisis humeral media (171) y se inserta en el epicóndilo medial del húmero. Este tabique permite separar los músculos anteriores y posteriores del brazo, permitiendo el origen del braquial, anteriormente y la cabeza medial del músculo tríceps braquial, posteriormente (171). El llegar al codo, el nervio cubital pasa a través de un túnel osteofibroso entre el olecranon lateralmente, y el epicóndilo medial medialmente (166). El suelo de este canal lo forma la porción posterior del ligamento colateral cubital (170,172,173) mientras que el techo está formado por una fascia también conocida como fascia de Osborne (174). Después de pasar

el túnel el nervio atraviesa el hiato que se forma entre las cabezas lateral y medial del FCC y que están unidas por un arco aponeurótico, denominado el ligamento arcuato de Osborne (173). Distalmente el nervio desciende sobre el músculo flexor superficial de los dedos (FSD) y cubierto por el FCC. Cuando llega al carpo el nervio pasa superficial al ligamento transversal del carpo y se dirige al canal de Guyon donde se bifurca en las ramas sensitivas y motoras para la inervación de la mano (170,175).

Durante todo este trayecto en brazo y antebrazo solo inerva a la parte medial de músculo flexor profundo de los dedos (FPD) y FCC, aunque existen trabajos que confirman que puede dar inervación a la (CMTB) antes de llegar al codo (176). Al llegar a la mano, inerva a los músculos de la región hipotenar, músculos interóseos ventrales y dorsales, 3º y 4º lumbrical, y aductor del pulgar. También recoge la inervación sensitiva de la cara palmar y dorsal del 4º y 5º dedo de la mano (170).

Para el diagnóstico de la compresión de un nervio ya se ha comentado que se requieren técnicas de radiodiagnóstico (169,177). La ecografía puede realizar un estudio dinámico del nervio y detectar una luxación del nervio, o una dislocación de posterior a anterior sobrepasando el epicóndilo medial. Además, puede favorecer la identificación de variaciones musculares como un músculo anconeus epitroclearis o una cuarta cabeza del músculo tríceps braquial como causa de una posible compresión de dicho nervio (178,179).

Sin embargo, como se ha comentado anteriormente, los puntos de paso del nervio cubital del compartimento anterior al posterior del brazo pueden dar lugar a compresiones de este, interfiriendo en el diámetro del nervio. Es por ello por lo que se recomienda ante cualquier síntoma que afecte a un nervio terminal se tenga en cuenta y se valore ecográficamente otros puntos de conflicto durante todo el trayecto nervioso (180).

8.-SONOANATOMÍA DEL ATRAPAMIENTO DEL NERVIOS PERIFÉRICO

Cuando existe una patología nerviosa la imagen ecográfica del nervio cambia y puede contribuir en el diagnóstico de su lesión, tal como se ha comentado en el párrafo anterior. Es evidente que el diagnóstico inicial de la lesión del nervio primero necesitará de una buena anamnesis y exploración del paciente y del nervio afectado; así mismo también de un examen neurofisiológico que valore el grado de lesión nerviosa a través de distintos parámetros (181). Sin embargo, el reconocimiento ecográfico del mismo permite realizar un estudio detallado del nervio periférico, dando información exhaustiva sobre los cambios morfológicos de los nervios, así como de los tejidos circundantes en la lesión del nervio (182). Estas exploraciones además pueden dar información sobre la musculatura inervada, la localización de la lesión nerviosa y el grado de la misma.

Dentro de la patología de un nervio periférico, las neuropatías por atrapamiento suelen ser frecuentes y son el resultado de una compresión crónica o dinámica de los nervios en zonas comprometidas como el paso de este por túneles óseos o fibromusculares. En estos puntos las paredes de los túneles no son extensibles, o existen otras estructuras anatómicas que ocupan el espacio por donde ha de transcurrir el nervio, como músculos accesorios, ganglios o quistes, espolones óseos.

Ecográficamente la compresión de un nervio se puede agrupar en tres clases (160):

- Compresión de nervios de gran diámetro como por ejemplo el nervio mediano, cubital o tibial. Estos nervios son fáciles de diagnosticar en el sitio exacto de compresión usando la sonda correcta y con frecuencia de hasta 13MHz. Para su diagnóstico se tiene en cuenta el análisis del patrón nervioso y el área transversal del nervio.
- Compresión de nervios de diámetro pequeño como por ejemplo el nervio interóseo anterior o nervio musculocutáneo o ramas distales de nervios de gran diámetro. Para

evaluar estos nervios no se puede utilizar el diámetro transversal del nervio y en este caso se puede utilizar un aumento de la vascularización del nervio visualizada con Doppler.

- Compresión de nervios de muy pequeño diámetro como por ejemplo el nervio calcáneo inferior o nervios de gran diámetro en puntos de escasa accesibilidad como el nervio femoral en la cavidad abdominal. En estos casos el estudio ecográfico es muy difícil y se ha de recurrir a la resonancia magnética computarizada.

En las primeras fases se produce una inflamación de los nervios por el edema intraneural y la congestión compresión venosa. Esta lesión se traduce ecográficamente en un cambio de la morfología apareciendo con imagen del nervio uniformemente aplanado, hipoecoico, debido a los fascículos hinchados y agrupados, pudiendo disminuir también la ecogenicidad del epineuro. Pero la imagen ecográfica patognomónica de atrapamiento de un nervio es la visualización del nervio aplanado en el sitio de compresión e hinchado proximalmente. También se puede observar una abrupta transición (signo de la muesca) entre los segmentos e hinchados. E incluso pueden llegar a observarse una hiperemia intraneural con el Doppler (183,184).

En todos los casos el área de seccional transversal del nervio, como medida tomada en una imagen en el eje corto del estudio ecográfico, también contribuye a su diagnóstico y puede ayudar a distinguir entre una lesión leve y moderada del nervio, sobre todo en nervios de gran diámetro (160).

En el caso del nervio cubital diferentes autores abordan las causas y el posible diagnóstico a través del estudio ecográfico (178,185) y todos ellos están de acuerdo con la utilidad de esta técnica para el diagnóstico de su atrapamiento (186) porque además puede detectar la inestabilidad del nervio de forma dinámica (187), así como la presencia de otras estructuras

anatómicas que puedan originar su compresión (120,179), apareciendo las imágenes del nervio alterado tal como se han descrito en la zona donde se produzca el atrapamiento.

Todos estos cambios se habrán de ir a buscar en un estudio ecográfico, donde se sospecha por la clínica el atrapamiento de un nervio. Esta técnica no sólo contribuirá al diagnóstico de la lesión de un posible nervio si no también a conocer la causa y consecuentemente aplicar el tratamiento más adecuado.

HIPÓTESIS

HIPÓTESIS

Un mayor conocimiento de la fascia profunda en la extremidad superior e inferior a través de la ecografía, de la disección anatómica e histología puede ayudar en el diagnóstico y tratamiento de distintas patologías del sistema musculoesquelético como son el síndrome compartimental y el atrapamiento de nervios periféricos.

OBJETIVOS

OBJETIVOS

Objetivos principales

- Estudiar la fascia antebraquial o profunda del antebrazo, ecográfica, anatómica e histológicamente, observando la relación con determinados músculos y estructuras vasculonerviosas, y su posible relación con el síndrome compartimental y atrapamientos nerviosos.
- Estudiar la fascia crural o fascia profunda de la pierna, ecográfica, anatómica e histológicamente, observando la relación íntima con determinados músculos implicados en patología compartimental.

Objetivos secundarios

- Analizar la correlación entre las imágenes obtenidas mediante el estudio ecográfico y la disección anatómica en el antebrazo y pierna.
- Detectar variaciones anatómicas por ecografía y la comprobación anatómica a través de la disección.
- Estudiar la fascia profunda del antebrazo y pierna histológicamente.
- Recomendar puntos de abordaje en antebrazo y pierna a través del estudio anatómico para evitar lesiones vasculonerviosas.

MATERIAL Y MÉTODOS

RESULTADOS

ARTICULO 1

Título: Compartimentos de la fascia antebraquial del antebrazo: Hallazgos ecográficos, anatómicos e histológicos clínicamente relevantes.

Introducción: El síndrome compartimental agudo se define como una afección que pone en peligro los músculos de las extremidades y está causada por sangrado o edema en un recinto cerrado como es un compartimento muscular rodeado de la fascia muscular. Esta circunstancia se produce más comúnmente en el antebrazo, que tiene tres compartimentos posterior, anterior y lateral. Éstos están rodeados por la fascia antebraquial o muscular o profunda del antebrazo, formada por densas capas de tejido conectivo que facilita su estudio en ultrasonido y es clave para el tratamiento de la fasciotomía. El propósito de este estudio es ampliar el conocimiento ecográfico, anatómico e histológico existente de la fascia profunda del antebrazo para facilitar su identificación en ultrasonido, con las posibles aplicaciones clínicas y terapéuticas que ello comporta.

Hipótesis: El estudio ecográfico, anatómico y histológico de la fascia antebraquial o profunda del antebrazo facilitará su identificación ecográfica para una aplicación y finalidad clínica y terapéutica.

Objetivos: Estudiar la fascia antebraquial o profunda del antebrazo, ecográfica, anatómica e histológicamente y su relación con determinados músculos y estructuras vasculonerviosas.

Material y métodos: El estudio se realizó en 50 extremidades superiores criopreservadas de cadáveres adultos de la sala de disección de la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud (campus de Bellvitge) de la Universitat de Barcelona. Todos ellos fueron examinados con ecografía y posteriormente se procedió a la disección anatómica y toma de muestras histológicas para estudiar la fascia, su espesor y su relación con diferentes músculos de los compartimentos del antebrazo.

Resultados: Se identificó la fascia antebraquial como una línea hiperecogénica y se observaron distintas relaciones musculares a través de la ecografía y la posterior disección de las mismas, entre la fascia y los músculos extensor cubital del carpo, extensor del quinto dedo y músculo ancóneo en el compartimiento posterior, y el flexor radial del carpo en el compartimiento anterior. Todos ellos se encontraban aislados por la fascia antebraquial. Por otro lado, los resultados de las mediciones de la fascia profunda con ecografía e histología fueron muy similares.

Conclusión: Estos resultados demuestran que la ecografía de alta definición nos permite identificar la fascia antebraquial y observar su estrecha relación con determinados músculos. Esto ayuda a identificar mejor estas estructuras, facilitando el diagnóstico de cualquier patología de éstas, y que puede ser de interés en aplicaciones terapéuticas y clínicas.



Compartments of the antebrachial fascia of the forearm: clinically relevant ultrasound, anatomical and histological findings

S. Ortiz-Miguel^{1,2} · M. Miguel-Pérez¹ · J. Navarro¹ · I. Möller¹ · A. Pérez-Bellmunt² · J. L. Agullo¹ · J. Ortiz-Sagristà³ · J. Blasi⁴ · C. Martinoli⁵

Received: 16 January 2021 / Accepted: 10 March 2021

© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag France SAS, part of Springer Nature 2021

Abstract

Purpose Acute compartment syndrome is defined as a limb-threatening condition caused by bleeding or oedema in a closed muscle compartment surrounded by fascia or bone. It is most commonly encountered in the forearm, which has three compartments: posterior, anterior and lateral. These are surrounded and closed in by the antebrachial fascia, formed by dense connective tissue that facilitates their study on ultrasound and is key to fasciotomy treatment. The purpose of this study was to broaden existing ultrasound, anatomical and histological knowledge of the fascia of the forearm to facilitate their identification on ultrasound, with possible clinical and therapeutic applications.

Methods The study was performed in 50 cryopreserved upper limbs from adult cadavers from the dissection room of the Faculty of Medicine and Health Sciences. They were examined on ultrasound and subsequent anatomical dissection and microscopy to study the fascia and its relationship with different muscles of the forearm compartments.

Results Distinct anatomical relationships were observed on ultrasound and dissection between the fascia and the extensor carpi ulnaris, extensor digiti minimi, and anconeus muscle in the posterior compartment, and the flexor carpi radialis and flexor carpi ulnaris in the anterior compartment. They were isolated by the antebrachial fascia and had distinct relationships with the neurovascular structures.

Conclusion These results demonstrate that high-definition ultrasound enables us to locate the antebrachial fascia and particular muscles with a distinct relationship with neurovascular structures. This helps better identify these structures, facilitating diagnosis of any pathology in the area, with potential therapeutic and clinical applications.

Keywords Antebrachial fascia · Ultrasound · Anatomical and histological study · Upper extremity · Implications

S. Ortiz-Miguel and M. Miguel-Pérez contributed equally to this work.

✉ M. Miguel-Pérez
mimiguel@ub.edu

¹ Unit of Human Anatomy and Embryology, University of Barcelona, C/Feixa Llarga s/n 08907, L'Hospitalet de Llobregat, Barcelona, Spain

² Basic Sciences Department, Universitat Internacional de Catalunya, Barcelona, Spain

³ Anesthesia department, Fundació Puigvert, Barcelona, Spain

⁴ Unity of Histology, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), University of Barcelona, Barcelona, Spain

⁵ Cattedra di Radiologia "R"-DICMI, Università di Genova, Genoa, Italy

Abbreviations

ACS	Acute compartment syndrome
A	Anconeus muscle
BOA	British Orthopaedic Association
ECU	Extensor carpi ulnaris
EDM	Extensor digiti minimi
ED	Extensor digitorum
FCR	Flexor carpi radialis
FCU	Flexor carpi ulnaris
FDS	Flexor digitorum superficialis
PL	Palmaris longus
PT	Pronator teres

Published online: 05 April 2021

Springer

Introduction

Acute compartment syndrome (ACS) is defined as a limb-threatening and occasionally life-threatening condition caused by bleeding or oedema in a closed muscle compartment surrounded by fascia or bone. This leads to muscle and nerve ischaemia caused by the raised pressure within a closed fascial space or compartment. The final common pathway is cellular anoxia due to local ischaemia. Such ischaemia is thought to begin once local blood flow is restricted by the rise in compartment pressure [10]. The most of the triggers of this clinical problem are well-known: acute trauma and reperfusion after treatment for acute arterial obstruction comprise up to 20% of cases in the forearm [10], but few authors have studied the aetiology in depth [16]. The perception of the aetiology of ACS is changing, with an increased prevalence of non-traumatic causes [5].

Guidelines on management of ACS were issued by the Trauma Group of the British Orthopaedic Association (BOAST 2014). The clinical diagnosis is based on pain out of proportion to the associated injury and pain on passive movement of the muscles of the involved compartments. The Association British Orthopaedic Association [6] recommend emergency surgery within an hour of the decision to operate (BOAST 2014), as untreated compartment syndrome usually leads to muscle necrosis, limb amputation, and, if severe and in large compartments, renal failure and death [10].

The body areas at risk of developing compartment syndrome are the limbs, and the most affected compartments are the anterior compartments in the leg and the forearm [10]. In both, the main treatment is fasciotomy. Fasciotomy is a surgical procedure that consists of one or more fascial incisions and remains the only effective way to treat acute and chronic compartment syndrome in the great majority of cases, but it should be avoided when the muscle is already dead. Although fasciotomy treatment of the forearm involves decompression of all involved compartments, there is no standard approach to achieve this result [1]. Some authors performed a cadaver study on different techniques and suggested that neither the single volar nor single dorsal incision technique would completely relieve the pressure in other compartments [20]. This fasciotomy acts on the antebrachial fascia, which lies deep to the layer of adipose tissue below the dermis [25] and forms a continuous layer of dense connective tissue, organised in parallel bundles of collagen fibres that run uninterrupted and whose function is to divide, surround and protect the deep structures [2].

In the upper and lower limbs, recent research describes the fascia as well-defined layers of dense connective tissue,

with a mean thickness of 1 mm, formed by 2 or 3 layers of bundles of intertwined collagen fibres, whose function is to separate and compartmentalise various muscular and neurovascular structures [9]. This dense connective tissue facilitates visualisation on ultrasound, as it is identified as a hyperechoic structure a few millimetres thick that surrounds and compartmentalises the various muscle groups [22]. Although a good anatomical knowledge is needed to perform anatomical-ultrasound correlation, the use of musculoskeletal ultrasound is currently well accepted for the study of several clinical situations affecting tendons, ligaments, muscles, nerves and joints, such as intersection syndrome, tendon rupture, space occupying lesions, or nerve compressions syndromes [13].

In the upper limb, the antebrachial fascia fixes, contains and compartmentalises muscular and neurovascular structures of great functional importance. Normally, an internal and external chain are described, the external giving rise to a continuous linked structure with a clear role in the transmission and coordination of movements and as a shock absorber. However, it has certain morphological characteristics, as the antero-external fascia is thicker and stronger than the postero-internal fascia [4]. This difference explains its biomechanical features such as elongation and load bearing, the thicker and more resistant fasciae being those involved in maintaining static posture. However, there are still many unanswered questions on the anatomical-ultrasound relationships of the antebrachial fascia and its muscular compartments that may be important in clinical practice, particularly in cases of compartment syndrome [1].

The main purpose of this study was to broaden existing ultrasound, anatomical and histological knowledge of the antebrachial fascia of the forearm and the specific anatomical relationship with certain muscles, vessels and nerves to facilitate identification on ultrasound and possible clinical applications.

Materials and methods

An observational anatomical and ultrasound study was performed of 50 upper limbs (24 left and 26 right) from 22 women (44%) and 28 men (56%) from cadavers that were cryopreserved at -20°C in the dissection room. The age range was 50–93 years. The limbs were numbered in order according to their anatomical-ultrasound and histological study. Dysmorphic limbs and those with previous surgery or trauma in the area being studied were excluded. The study was approved by the local ethics committee.

Prior to the serial study, six forearms were dissected in the anatomical position to observe the relationships between the antebrachial fascia and the different muscles in the anterior, posterior and lateral compartments and to visualise the

different subcompartments that this fascia forms and which were the object of this study. Once the presence of these muscular subcompartments had been confirmed, we proceeded to the ultrasound study.

With the aim of identifying and studying on ultrasound the antebrachial fascia at the same reference point in all forearms, we marked with an indelible marker the mid-point of the dorsal surface of the forearm (after taking anthropometric measurements corresponding to the distance between the radial head and the styloid process). Ultrasound and anatomical dissection were then performed.

Ultrasound study

The ultrasound study was performed with the LOGIQ P6 ultrasound system (GE ultrasound Korea. LTD., Seongnam, Korea) with a high-frequency linear probe 6–15 MHz in 44 upper limbs. First, on transverse and longitudinal axis, we visualised the muscles of the forearm compartments and their relationships with the antebrachial fascia that covered them. A systematic study at the posterior compartment of the forearm was made. An US-guided injection, with a 20G needle and parallel to the transducer, of 3 mL of dye was done (1 mL red or green dye with 2 mL saline), below the fascia covering the extensor carpi ulnaris (ECU) and the extensor digiti minimi (EDM). For the anconeus muscle (A), we looked for the fascia covering the muscle and injected below it, also with ultrasound guidance. Then, the probe was moved to the anterior compartment and the same system was used, injecting dye below the fascia of the flexor carpi radialis (FCR) muscle and flexor carpi ulnaris (FCU). On a short axis view, a sweep was performed to observe adequate diffusion of the dye inside the injected compartments.

Anatomical study

After the ultrasound study, we proceeded to the gross anatomical study with dissection of the 35 forearms and with six transverse cuts on the forearm at the point of injection.

The anatomical dissection was performed following a classic method in planes with a longitudinal medial incision and two horizontal incisions at the elbow proximally and at the wrist distally, first on the dorsal surface and then on the ventral surface of the forearm.

After dissection in planes of the skin and subcutaneous o-adipose tissue, the fascia of the posterior compartment was exposed, and the location of the dye was studied to see if there had been extravasation or not, for each of the muscles studied (ECU, EDM and A), the same system was followed in the anterior compartment (FCR and FCU). Once the fascia was released, we checked that the dye was contained between the fascia and muscle and had not dispersed to the surrounding muscles. Lastly, we measured the length

of origin of each of the muscles in the fascia or aponeurotic septum (termed the intermuscular aponeurosis) and the free portion until their insertion. At each step, photographs were taken to record information (Canon EOS 60D).

We dissected the course of the median nerve and measured its thickness at two points: the first, 2 cm proximal to the wrist crease, and the second, just before to the entry of the median nerve into the carpal tunnel; we also checked for the presence of a palmaris longus tendon.

On 6 upper limbs, the study of sectional anatomy in transverse cuts performed at the mid-point of the forearm allowed us to observe whether the dye was contained below the antebrachial fascia and its relationship to the muscles studied.

Histological study

On three upper limbs, randomly chosen, the antebrachial fascia was studied by ultrasound, measuring the thickness of this fascia over each of the muscles studied. We obtained 2 × 3 cm samples of the antebrachial fascia. They were fixed with formaldehyde 4% and they were processed until obtained paraffin blocks. Afterwards, they were cut in 4 µm and dyed with haematoxylin–eosin, following the classic procedure to its histological study. The samples were observed and measured with a microscope Leica DMD 108.

Samples at these points were taken to observe the histology of the different fascia and to observe histological differences between them. Also, the thickness of the fascia measured were correlated by ultrasound with that obtained on histology.

Statistical analysis was performed on all the data obtained for the control variables (sex, limb side and age) and anthropometric variables (forearm surface measurements, length of origin, length of free portion, and median nerve diameter). Test Bland–Altman–Plot was applied to compare the thickness of the fascia by histology and ultrasound study.

Results

Ultrasound study

In all the upper limbs, the ultrasound study of the forearm allowed identification of the antebrachial fascia, below the adipose tissue, as a continuous, well-differentiated echogenic line that surrounded the muscles of the anterior, posterior and lateral compartments. This fascia isolated each of the muscles studied: ECU, EDM, and A on the dorsal surface, and FCU and FCR on the volar surface (Figs. 1a, 2a, and 3a). This allowed the injection of dye into each of the spaces below the antebrachial fascia and the different muscles studied as described in the methods.

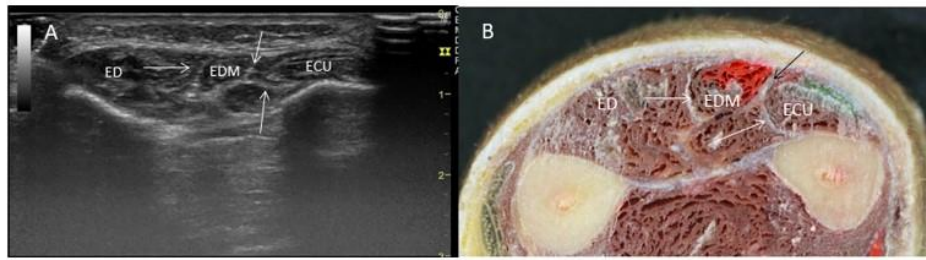


Fig. 1 **a** An ultrasound view, **b** anatomical cut of the posterior compartment of the forearm. The arrows show the fascia isolating the extensor carpi ulnaris (ECU) and extensor digiti minimi (EDM) from

the extensor digitorum (ED) as an hyperechoic line by ultrasound. In the anatomical cut the green and red dye was into each of the spaces below the deep fascia of the EDM and ECU respectively

Fig. 2 **a** An ultrasound view of the anconeus muscle (**a**). The arrows sign the tendon of the triceps brachii muscle and its relation with anconeus muscle. **c** Histology of the fascia shows the different layers of it

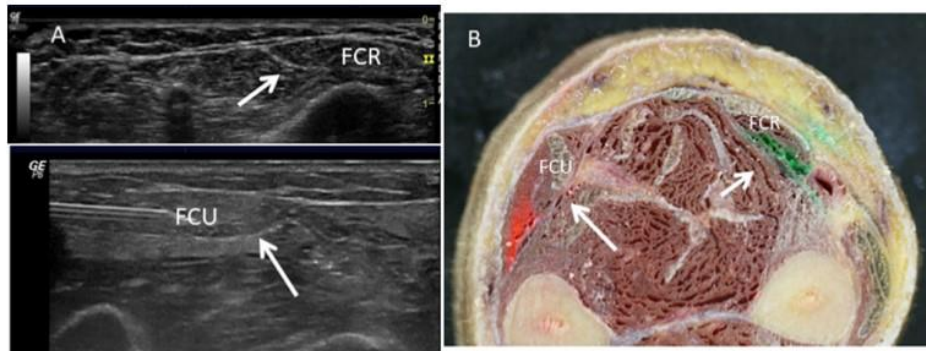
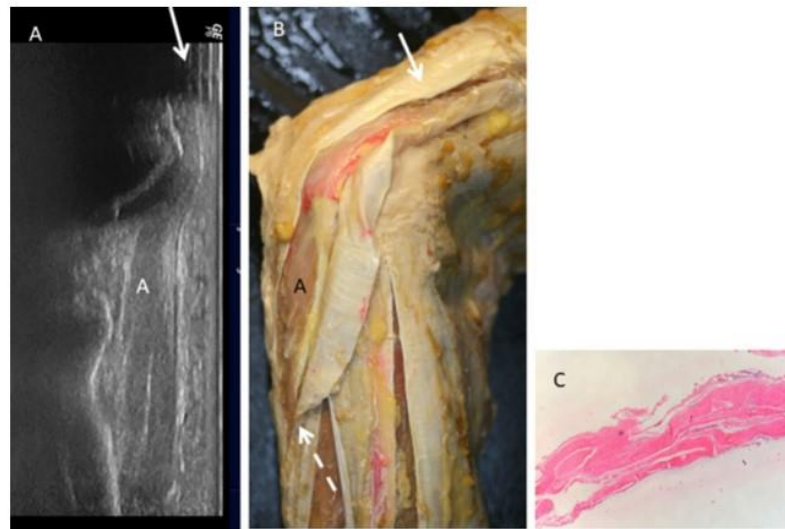


Fig. 3 **a** An ultrasound view and **b** anatomical cut of the anterior compartment of the forearm. Arrows show the fascia that surrounding the flexor carpi radialis (FCR) and the flexor carpi ulnaris (FCU)

muscles and isolated of the other muscles as an hyperechoic line by ultrasound. In the anatomical cut the green and red dye was into each of the spaces below the deep fascia of the FCR and FCU respectively

More detailed study of the antebrachial fascia for each muscle showed that the separation between the muscles was produced by deep, echoic, perpendicular extensions of this fascia and that they formed septa between the different superficial muscles (100%). In the posterior compartment of the forearm, the septum between the ECU and EDM appeared as a thin hyperechoic continuous line that demarcated and contained the muscle along its length, unlike the septum between the EDM and extensor digitorum (ED) which was observed as a discontinuous hyperechoic line, and was even hypoechoic at some segments, but which could be identified nonetheless (Fig. 1a). In the case of the anconeus muscle, the fascia demarcated and completely isolated the muscle, creating a single compartment for this muscle alone, and we observed a hyperechoic extension originating at the lateral border of the triceps tendon and inserting at the lateral border of the olecranon (Fig. 2a).

Regarding the anterior compartment of the forearm, the antebrachial fascia was also visualised as an echoic band surrounding the whole compartment and originating at the medial epicondyle. Similarly to the posterior compartment, some echogenic lines running deep in a perpendicular direction to the probe, that, in the form of intermuscular septa

from the fascia in the proximal half of the forearm, surrounded and isolated the FCU and FCR muscles (Fig. 3a), allowing their identification and that of palmaris longus (PL). This facilitated injection of the dye, and it was able to observe its spread inside each muscular compartment studied.

The study of the lateral compartment of the forearm also allowed us to observe the antebrachial fascia as a thin echogenic line, but we did not observe any perpendicular echogenic line separating the muscles in this compartment.

Anatomical study

The anatomical study after ultrasound showed, in all cases, that the dye injected remained below the fascia for each of the muscles studied, and at no point extravasated dye in other muscle compartments. This therefore may demonstrate the existence of an individual compartment for each of the muscles studied (Figs. 1b, 2b, 3b, 4 and 5).

Dissection revealed that the antebrachial fascia in the posterior compartment was fixed at the lateral epicondyle, and it continued distally forming part of the origin of the extensor muscles (Fig. 4a, b). However, immediately from the fascia,

Fig. 4 a, b Anatomical dissection of the posterior compartment shows that the dye spread only inside each muscular compartment, green dye below the extensor carpi ulnaris (ECU) and red dye below the extensor digiti minimi (EDM). c Arrows sign the expansion of the deep fascia that inserts in the ulna and isolates the ECU

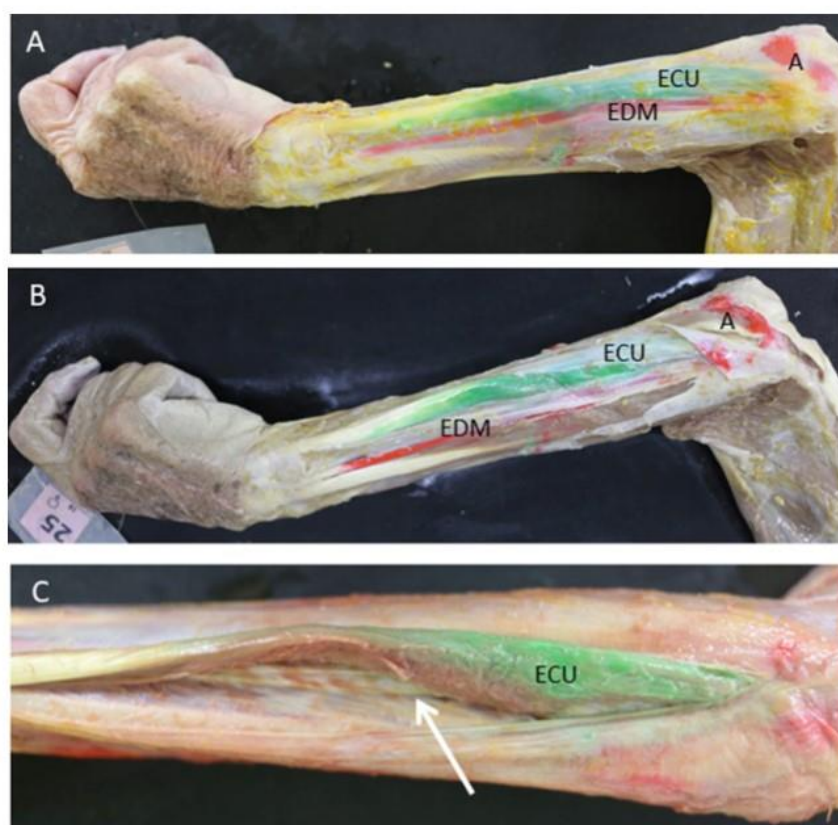
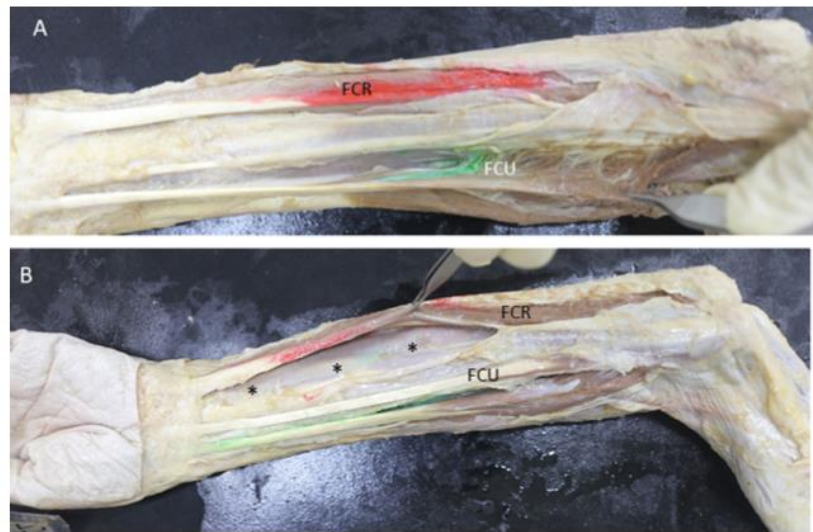


Fig. 5 a, b Anatomical dissection of the anterior compartment shows that the dye spread only inside each muscular compartment, red dye below the flexor carpi radialis (FCR) and green dye below the flexor carpi ulnaris (FCU) *show that these muscle are isolate by a different fascia from the flexor digitorum superficialis (color figure online)



there were deep extensions perpendicular to the fascia, in the form of septa, termed intermuscular aponeurosis that separated the origin of the ED, EDM and ECU muscles. For ECU, the intermuscular aponeurosis continued to the wrist, and, together with the medial attachment of the fascia along the entire medial edge of the ulna, created a chamber exclusively for ECU, until arriving at the 6th dorsal compartment of the wrist (Fig. 4c). The muscles EDM and ED were separated by a fine fascial septum (Fig. 1b), which disappeared in the distal third of the forearm. As on ultrasound, the dissection showed that in all the limbs studied, the antebrachial fascia surrounded and isolated ECU to create an individual compartment (Fig. 1b). In the case of the A, a muscle traditionally located in the arm, it was situated at the transition between the arm and forearm, at the elbow joint. In this muscle, the antebrachial fascia continued proximally with the fascia of the arm that in turn continued with the medial border of the triceps brachii tendon, and distally anchored in the ulna, forming a very thick fibrous septum that separated it from the fascia surrounding ECU (Fig. 2b).

In the anterior compartment, we observed that the antebrachial fascia was attached to the medial epicondyle of the humerus, covering the medial epicondyle origins of pronator teres (PT), FCR, PL and FCU, and giving rise to the deep origin of these muscles. In a similar way to the posterior compartment we observed perpendicular extensions, which formed separating septa between the origins of the muscles PT, FCR, PL, and FCU, which continued to the wrist (Fig. 5a), and isolated them from flexor digitorum superficialis (FDS). (Fig. 5b) In the case of FCR and FCU, the fascia continued beyond the wrist, isolating the

tendon from the rest of the structures and from the radial and ulnar neurovascular bundles. The same happened with PL, it was present in 63.75% of the specimens. Although PL was not injected, it descended independently and was isolated in a special compartment created by the antebrachial fascia. In the distal third of the forearm, this fascia was identified at two levels: superficial, surrounding and connecting the tendons of FCU, FCR and PL, and deep, which isolated FDS (Fig. 5b).

Regarding the measurements taken, the length of origin of these muscles in the intermuscular aponeurosis was 112.2 ± 24.7 mm for ECU, and 121.1 for EDM (Table 1a) 101.7 ± 15.6 mm for FCR, 108.7 ± 57 mm for FCU (Table 1b). The length of the free portion of the muscle was 131 ± 38.9 mm for ECU, and 126.4 ± 2.8 mm for EDM (Table 1a), 157.1 ± 26.9 mm for FCR, 151.6 ± 10.6 mm for FCU (Table 1b). The insertion of EDM had an independent origin from the surrounding muscles and its own intermuscular aponeurosis in 91.18% of the specimens.

Distally, just before arriving at the wrist crease, the antebrachial fascia allowed the passage of the median nerve where it becomes superficial. At this point, just before entry to the carpal tunnel, the median nerve had a mean diameter of 5.94 ± 0.93 mm while at 2 cm proximal to the joint crease it had a diameter of 6.12 ± 0.71 mm (Table 2). When we studied the correlation between thickness of the median nerve and presence of PL muscle, the mean thickness in the specimens with PL was 6.11 mm while in the specimens without PL, it was 5.88 mm. However, analysis using the Mann–Whitney test showed there was no significant correlation, with a *p* value of 0.8510.

Table 1 (a) It shows the measurements of the fascia at the posterior compartment (cm); also it indicates the presence of an independent extensor digiti minimi origin and the individual compartment of the

anconeus; (b) it shows the measurements of the fascia (cm) at the anterior compartment and the presence of the palmaris longus

(a) Variable	Posterior					Anc
	ECU		E5°	EDM		Lind
	Insertion	Free		Insertion	free	
Average	11.22	13.10	NO 3	12.11	12.64	YES 34
Standard deviation	2.47	3.89	YES 31	0.00	0.280	NO 0
Median	10.2	14.35		11.85	12.85	
Percentile 25%	8.95	13.48		10.28	11.43	
Percentile 75%	12.28	15.48		13.48	14.13	

(b) Variable	Age	Sex	Side	Anterior			
				FRC		PL	Free
				Insertion	Free	Present	
Average	78.11	H 18	Right 14	10.17	15.71	NO 13	10.87
Standard deviation	12.73	M 16	Left 20	1.56	2.69	SI 21	0.57
Median	81			10	15.65		10.9
Percentile 25%	63.75			8.4	14.73		9.43
Percentile 75%	88.5			11	17.23		11.9

Table 2 Diameter of the median nerve

Variable	Median nerve	
	Proximal	Distal
Average	6.12	5.94
Standard deviation	0.71	0.93
Median	6.16	6.02
Percentile 25%	5.62	5.42
Percentile 75%	6.45	6.87

Histological study

All the samples showed the connective tissue organisation in two and three different layers. However, they were some differences between them.

The antebrachial fascia in the posterior side of the forearm had different layer's disposition. While, ECU's fascia (0.444 mm) was more compact, the EDM's fascia (0.390 mm) had a longitudinal layer and a transversal layer and the anconeus' fascia (0.571 mm) was wider and showed different layers (Fig. 6a).

The antebrachial fascia in the anterior side of the forearm showed the different longitudinal layer in the FCR's fascia (0.407 mm) but it was narrower than the fascia in the middle line of forearm (0.518 mm) and the FCU's fascia (0.424 mm) that had the different longitudinal layers more compact between then (Fig. 7b).

Thickness of the different fascia by histology and the ultrasound study could be observed in the Fig. 6, and 7.

Results with Test Bland–Altman–Plott showed that the differences in mm between the histology and the ultrasound measures were minim (− 0.002 mm) (Table 3).

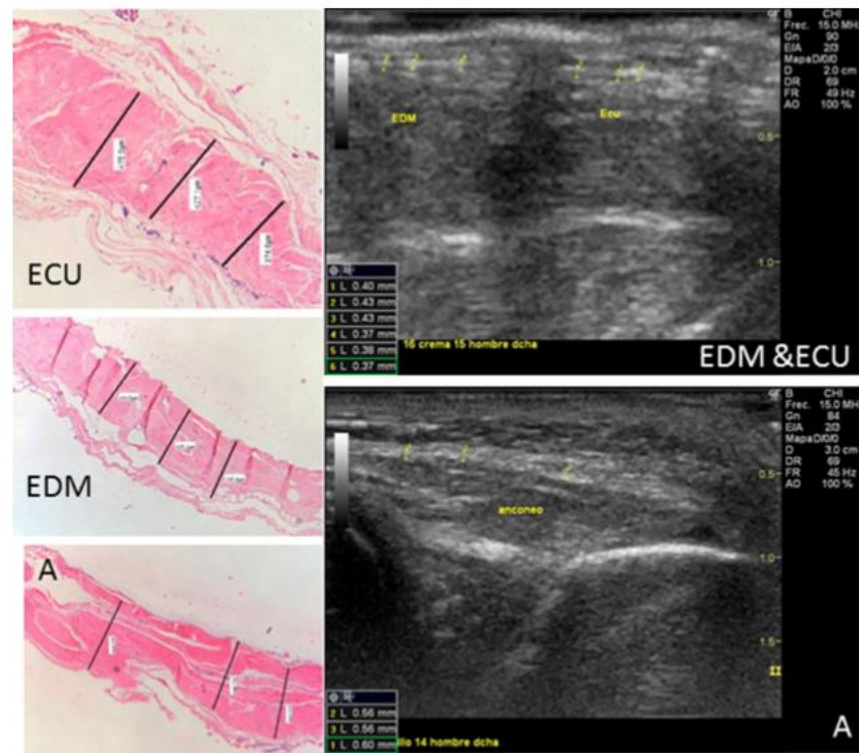
Discussion

The results obtained were in line with those by other authors [3, 14, 25, 26], show that high-definition ultrasound with a frequency of 6–15 MHz allows the identification of the antebrachial fascia of the forearm and adjacent structures. It also demonstrates that this fascia is very closely associated with some of the muscles of the posterior and anterior compartments of the forearm, and the anterior vessels and nerves which should be taken into account in cases of compartment syndrome of the forearm.

Several authors [18, 21, 28] have reported that the two volar (or anterior) compartments and the dorsal (or posterior) compartment are likely involved in the pathophysiology of compartment syndrome of the forearm. However, the anterior compartment is more commonly involved. This may be due to several reasons.

The first is that the main neurovascular bundles in the forearms and the hand are on the volar surface. The second is that the antebrachial fascia on this volar surface separates in two layers: the superficial one, where the FCR, PL, and FCU are separated and isolated but connected, and the deep layer, which encloses FDS and is associated with the ulnar and radial neurovascular bundles, the median nerve, and the rest of the deeper musculature [1, 8] These aspects should be

Fig. 6 Measurements and histological structure of the fascia of the extensor carpo ulnaris (ECU) and extensor digiti minimi (EDM) and anconeus (A) on the left side comparing with the ultrasound cut on the right side. Histology shows the different layers of the different samples



taken into account when performing a fasciotomy. Several authors report that a single volar incision should be sufficient to release all the compartments in the case of a compartment syndrome [8, 18, 21], or several incisions starting from the most proximal part of the forearm [1]. However, this study would suggest that due to the two distinct fascial levels described and the associations between the neurovascular bundles and the muscular compartments, multiple fasciotomies would be required: one at the medial border of FCR, one at the lateral border of FCU [20] between FCU and FDS, and a third medial fasciotomy to release FDS with the median nerve and the rest of the deep muscles, as shown in Fig. 8. In this way, all the neurovascular structures of the volar surface of the forearm would be more effectively released. In the dorsal forearm, a midline approach between extensor digitorum communis and extensor carpi radialis brevis has been proposed by some authors as a simple and safe method [20], but this study shows that ECU is isolated from the other muscles and has no relation to the neurovascular system, so a midline approach over ED would be sufficient.

Regarding the visualisation of the antebrachial-fascia of the forearm, several studies [14, 17, 19, 24] have already confirmed its existence below the subcutaneous o-adipose tissue, describing it as an echogenic line of differing thickness, being thicker on the dorsal aspect of the forearm, this

may be in relation to the greater demand for movement on the flexor side. However, we have not found any studies that refer to the septa or perpendicular extensions from the antebrachial fascia that are visible on ultrasound and that extensively surround and isolate the muscles ECU, EDM, anconeus, FCR, FCU and PL.

Anatomically, the existence of these septa coming from the antebrachial fascia of the forearm has been described, with different terminology [7, 12, 15, 23], coinciding with the perpendicular extensions described in our study. Although it is difficult to adopt a specific term for this structure if there is no appropriate criteria, this study terms them intermuscular aponeurosis as they gave rise to the origin of muscular fibres [27], even if in reality, they were an extension of the antebrachial fascia wrapping around them. Also, unlike other studies that only describe an intermuscular aponeurosis for FCU and the ulnar neurovascular bundle [27], and the importance of the intermuscular aponeurosis of FCR origin [1], this study describes ultrasonographically and anatomically, these aponeuroses in more than one muscle. Rather, this study measured the length of the origin of these muscles in the intermuscular aponeurosis, the free portion of the muscle generally being longer, although the figures cannot be compared against any other study. One possible explanation of this common, though septated, muscular origin, would be that it would help allow proximal

Fig. 7 Measurements and histological structure of the fascia of the flexor carpi radialis (FCR), the middle of the forearm and the flexor carpi ulnaris (FCU) on the left side comparing with the ultrasound cut on the right side. Histology shows the different layers of the different samples

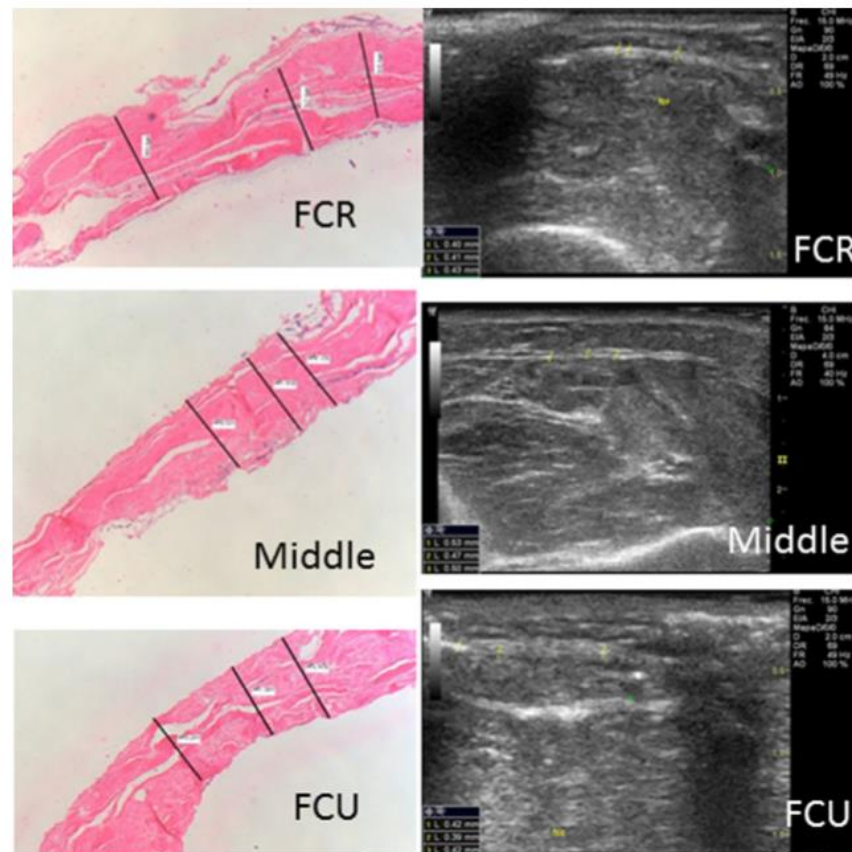
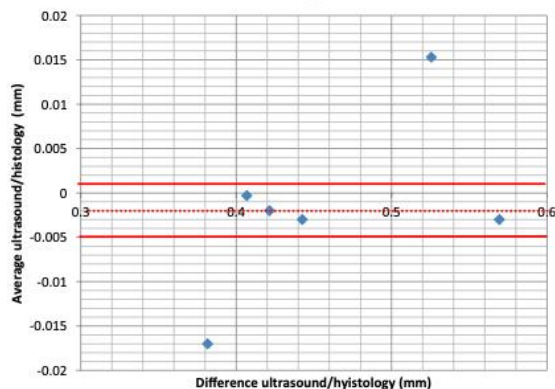


Table 3 Test Bland–Altman plot shows the results to compare the thickness of the fascia between histology and ultrasound



There are a third of the differences between studied methods that are not inside the 95% CI but the rest is inside

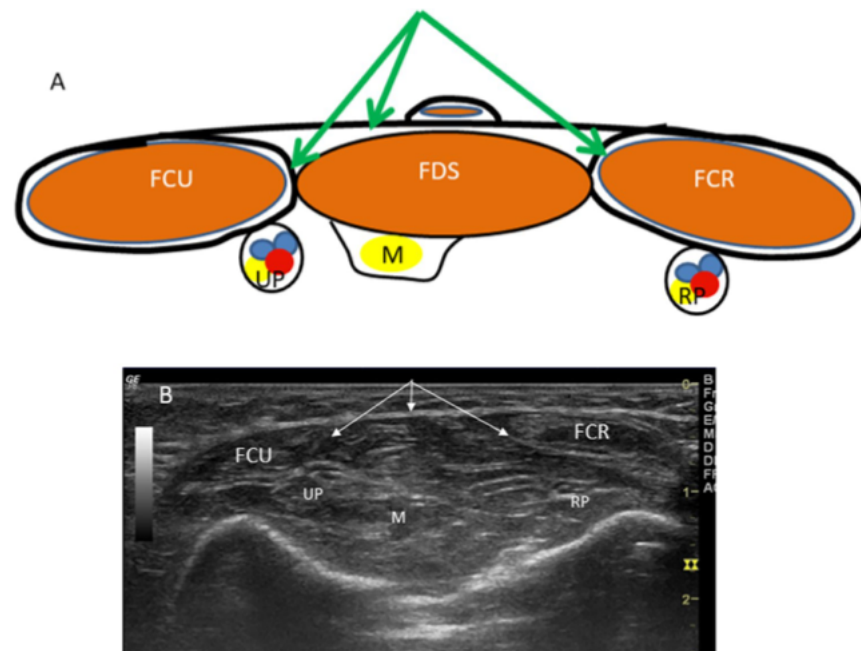
movements with more power, while the free portion, longer and isolated by part of the antebrachial fascia, would allow the specific movements of each of these muscles. However,

this isolation could be disadvantageous in the case of compartment syndrome and could increase the pressure in the distal forearm, with repercussions for the neurovascular bundles situated below FCR and FCU. This therefore suggests that fasciotomies should be performed at several points.

We also agree with other authors [27] that the FCU muscle is independent from the ulnar neurovascular bundle as the fascia that surrounds FCU also does so posteriorly, making it independent. The same was also observed with the radial neurovascular bundle and FCR. However, it is important to evaluate this relationship between these muscle and neurovascular bundles: since they cover them, they act as anatomical protectors of these vessels and nerves that also facilitate their localization on ultrasound, but that can also compress them. Therefore, in compartment syndromes, these anatomical relationships could contribute to further compression of the neurovascular bundle.

Finally, several authors have studied the associations between the absence of PL and a possible aetiology involving a variation in the vasculature and perineural sheath [26] that would cause ischaemic and morphological changes in the median nerve and lead to greater rigidity, manifesting

Fig. 8 a, b The draw and ultrasound view shows the points (arrows) where the fasciotomy would be required: one at the medial border of flexor carpi radialis (FCR), one at the lateral border of flexor carpi ulnaris (FCU) between FCU and flexor digitorum (FDS), and a third medial fasciotomy to release FDS with the medianus nerve and the rest of the deep muscles. Also, the relation of the FCR with the radial package (RP) formed by the radial vessels and the sensitive branch of the radial nerve and the FCU with the ulnar package (UP) formed by the ulnar vessels and nerve is observed



with signs similar to carpal tunnel syndrome [9, 11]. The results of the present study could be in agreement with these authors as the diameter of the median nerve was smaller in the limbs that had no PL, although the data obtained did not show a statistically significant correlation, but they would support a possible anatomical manifestation of nerve damage with a reduction in diameter.

Another aspect to take into account with compartment syndrome would be the presence of the nerve endings in the antebrachial fascia. This would mean that it could have a degree of sensation and mobility, achieving spontaneous contraction during stretching and small trauma [28] that could also predispose to compartment syndrome. This study does not demonstrate the existence of these but we consider it a subject for future studies and for evaluation in the etiology and treatment of these syndromes.

Histology confirms that 2 or 3 layers of dense connective tissue form the antebrachial fascia. Its thickness is very similar in all of them and minor to 1 mm. Its tissue facilitates visualisation on ultrasound, as it is identified as a echoic structure and when we compare thickness of the different fascia by histology and the ultrasound study, we observe that the differences were minim and these differences (-0.002 mm) did not invalidate the clinic use in the ultrasound estimation of the fascia's thickness. This can help in the fasciotomies because allow to visualise the antebrachial fascia and to control the level and deep of the cut.

Although it would be necessary more samples and that there are a third of the differences between studied methods

that are not inside the 95% CI we believe that there are minim differences (-0.002 mm) and they do not invalidate the clinic use in the ultrasound estimation of the fascia's thickness.

Conclusion

This study provides greater knowledge of the ultrasound, the anatomy and the histology of the antebrachial fascia of the forearm and its relationship to the more superficial muscles of the forearm and neurovascular structures, previously undescribed. This allows better identification of these structures, facilitating diagnosis of any pathology in the area, with potential clinical and therapeutic applications.

Acknowledgements The authors are grateful to the body donors and their families. We also thank Jose Luis and Gemma Ramón and Eva Sanchez for their assistance in the dissection room and laboratory.

References

1. Benamran L, Masquelet AC (2018) A cadaver study into the number of fasciotomies required to decompress the anterior compartment in forearm compartment syndrome. *SurgRadiolAnat* 40(3):281–287. <https://doi.org/10.1007/s00276-017-1947-3>
2. Benjamin M (2009) The fascia of the limbs and back—a review. *J Anat* 214(1):1–18. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7580.2008.01011.x>

3. Bianchi S, Martinoli C, Derchi LE (2011) Ecografiamuscoloesquelética. Marbán, Madrid. <https://doi.org/10.1016/j.rh.2014.10.001>
4. Boabighi A, Kuhlmann JN, Lubinski J, Landjerit B (1993) Aponeuroses and superficial fascia. Mechanical and structural properties. Bulletin de l'Association des Anatomistes 77:3–7
5. Bodansky D, Doorgakant A, Alsousou J et al (2018) Acute compartment syndrome: do guidelines for diagnosis and management make a difference? Injury 49:1699–1702. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2018.04.020>
6. British Orthopaedic Association BAOPrAS, Royal College of Nursing (2014) BOAST 10: Diagnosis and management of compartment syndrome of the limbs. Br Orthopaedic Assoc Stand Trauma. <https://www.boa.ac.uk/publications/boa-stand-ards-trauma-boasts>
7. Degeorges R, Masquelet AC (2002) The cubital tunnel: anatomical study of its distal part. SurgRadiolAnat 24(3–4):169–176. <https://doi.org/10.1007/s00276-002-0032-7>
8. Fontes D, Clement R, Roure P (2003) Endoscopic aponeurotomy for chronic exertional compartment syndrome of the forearm: a series of 41 cases. Chir Main 22(4):186–196. [https://doi.org/10.1016/s1297-3203\(03\)00060-x](https://doi.org/10.1016/s1297-3203(03)00060-x)
9. Gaikwad MR, Ravi PK, Patnaik M (2019) A case of potentially lethal vascular variation in association with palmarisprofundus muscle. Anat Cell Biol 52(3):349–353. <https://doi.org/10.5115/acb.19.061>
10. Gourgiotis S, Villias C, Germanos S, Foukas A, Ridolfini MP (2007) Acute limb compartment syndrome: a review. J SurgEduc 64(3):178–186. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2007.03.006>
11. Guclu D, Arican M, Unlu EN (2018) Median nerve entrapment due to accessory palmarislongus muscle: MRI and sonography findings. BMJ Case Rep 2018:1–2. <https://doi.org/10.1136/bcr-2018-224852>
12. Inserra S, Spinner M (1986) An anatomic factor significant in transposition of the ulnar nerve. J Hand Surg Am 11(1):80–82. [https://doi.org/10.1016/s0363-5023\(86\)80109-5](https://doi.org/10.1016/s0363-5023(86)80109-5)
13. Ipaktchi K, Wingfield J, Colakoglu S (2019) Fasciotomy: upper extremity. In: Ipaktchi K (ed) Compart syndrome: a guide to diagnosis and management, chapter 7. Springer, Cham, pp 59–66
14. Lee KJ, Jin W, Kim GY et al (2015) Sonographic features of superficial-type nodular fasciitis in the musculoskeletal system. J Ultrasound Med 34(8):1465–1471. <https://doi.org/10.7863/ultra.34.8.1465>
15. Mackinnon SE, Novak CB (2007) Operative findings in reoperation of patients with cubital tunnel syndrome. Hand 2(3):137–143. <https://doi.org/10.1007/s11552-007-9037-3>
16. McQueen MM, Gaston P, Court-Brown CM (2000) Acute compartment syndrome. who is at risk? J Bone Jt Surg Br 82(2):200–203
17. Meng S, Tinhofer I, Weninger WJ, Grisold W (2014) Anatomical and ultrasound correlation of the superficial branch of the radial nerve. Muscle Nerve 50(6):939–942. <https://doi.org/10.1002/mus.24235>
18. Ojike NI, Ala SR, Battista CT, Roberts CS (2012) A single volar incision fasciotomy will decompress all three forearm compartments: a cadaver study. Injury 43(11):1949–1952. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2012.08.006>
19. Pirri C, Stecco C, Fede C, Macchi V, Özçakar L (2020) Ultrasound imaging of the fascial layers: you see (only) what you know. J Ultrasound Med 39(4):827–828. <https://doi.org/10.1002/jum.15148>
20. Ronel DN, Mtui E, Nolan WB (2004) 3rd Forearm compartment syndrome: anatomical analysis of surgical approaches to the deep space. Plastic ReconstrSurg 114(3):697–705. <https://doi.org/10.1097/01.prs.0000130967.42426.23>
21. Ruyter J, Rutka V, Garret J, Rizzo C, Guigal V (2020) Endoscopic fasciotomy for chronic exertional compartment syndrome of the forearm: clinical results of a new technique using an endoscopic carpal tunnel release device. Hand SurgRehabil 39(3):154–158. <https://doi.org/10.1016/j.hansur.2020.01.011>
22. Seth R, Vijayan R, Khandwala A (2015) Double jeopardy: two episodes of forearm compartment syndrome in the same patient. BMJ Case Rep. <https://doi.org/10.1136/bcr-2014-208079>
23. Standring S, Gray H (2008) Gray's anatomy: the anatomical basis of clinical practice, 40th edn. Churchill Livingstone, London, p 1551
24. Stecco C, Macchi V, Porzionato A, Duparc F, De Caro R (2011) The fascia: the forgotten structure. Ital J AnatEmbryol 116:127–138
25. Stecco C, Tiengo C, Stecco A, Porzionato A, Macchi V, Stern R et al (2013) Fascia redefined: anatomical features and technical relevance in fascial flap surgery. SurgRadiolAnat 35(5):369–376. <https://doi.org/10.1007/s00276-012-1058-0>
26. Stecco C, Giordani F, Fan C et al (2019) Role of fascia around the median nerve in pathogenesis of carpal tunnel syndrome: microscopic and ultrasound study. J Anat 236(4):660–667. <https://doi.org/10.1111/joa.13124>
27. Won HS, Liu HF, Kim JH, Kwak DS, Chung IH, Kim IB (2016) Intermuscular aponeuroses between the flexor muscles of the forearm and their relationships with the ulnar nerve. SurgRadiolAnat 38(10):1183–1189. <https://doi.org/10.1007/s00276-016-1695-9>
28. Yahia LH, Pigeon P, DesRosiers EA (1993) Viscoelastic properties of the human lumbodorsal fascia. J Biomed Eng 15(5):425–429. [https://doi.org/10.1016/0141-5425\(93\)90081-9](https://doi.org/10.1016/0141-5425(93)90081-9)

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

ARTÍCULO 2

Título: Posibles puntos de atrapamiento del nervio cubital en el brazo y antebrazo: estudio ecográfico, anatómico e histológico.

Introducción: El atrapamiento del nervio cubital es una de las neuropatías por atrapamiento más comunes, que generalmente ocurre en el túnel cubital del codo y en el canal de Guyon de la muñeca. Sin embargo, puede tener otras localizaciones anatómicas que pasen desapercibidas. Por ello el objetivo es revisar otras posibles ubicaciones de atrapamiento del nervio cubital a través de un estudio ecográfico y anatómico.

Hipótesis: El estudio ecográfico y anatómico del nervio cubital durante todo su recorrido en la extremidad superior puede ayudar a localizar puntos de atrapamiento en relación con la fascia profunda u otras localizaciones no tan frecuentes, como las descritas en la literatura.

Material y Métodos: se estudiaron once extremidades superiores que fueron examinadas con ecografía y posteriormente diseccionadas en la sala de disección de la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud (campus de Bellvitge) de la Universitat de Barcelona. En el estudio se valoraron cuatro puntos anatómicos específicos, y cualquier variación anatómica que pudiera estar en relación con el nervio cubital. Además, se tomaron seis muestras del nervio para análisis histológico.

Resultados: Se observaron distintas relaciones anatómicas durante la ecografía y la disección entre el nervio cubital y el tabique intermuscular medial, expansión de la fascia braquial del brazo, el epimysio del músculo tríceps braquial, el ligamento arqueado de Osborne y la aponeurosis intermuscular entre el flexor cubital del carpo y el músculo flexor superficial de los dedos. el estudio estadístico mostró que estos lugares son áreas potenciales para la compresión del nervio cubital. Además, el hallazgo de una cuarta cabeza del músculo tríceps braquial acabó de confirmar la posibilidad de la existencia de variaciones anatómicas que pueden ser causa de atrapamiento y compresión del nervio.

Conclusión: Los resultados demuestran que el ultrasonido es una buena herramienta para investigar la neuropatía por atrapamiento del nervio cubital e identificar otros puntos anatómicos donde el nervio puede tener un atrapamiento y ser comprimido.

Article

Possible Points of Ulnar Nerve Entrapment in the Arm and Forearm: An Ultrasound, Anatomical, and Histological Study

Andrea Ferre-Martinez ^{1,†}, Maribel Miguel-Pérez ^{1,*,†}, Ingrid Möller ¹ , Sara Ortiz-Miguel ^{1,2}, Albert Pérez-Bellmunt ² , Núria Ruiz ^{1,3}, Xavier Sanjuan ^{3,4}, Jose Agullo ¹, Juan Ortiz-Sagrà ⁵ and Carlo Martinoli ⁶

- ¹ Unit of Human Anatomy and Embryology, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), University of Barcelona, 08907 Barcelona, Spain
 - ² Basic Sciences Department, Universitat Internacional de Catalunya, 08017 Barcelona, Spain
 - ³ Department of Pathology, University Hospital of Bellvitge, 08907 Barcelona, Spain
 - ⁴ Unit of Pathological Anatomy, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), University of Barcelona, 08907 Barcelona, Spain
 - ⁵ Anesthesiology Department, Fundació Puigvert, 08025 Barcelona, Spain
 - ⁶ Cattedra di Radiologia “R”-DICMI, Università di Genova, 16126 Genoa, Italy
- * Correspondence: mabelmig@gmail.com; Tel.: +34-93-402-0170
† These authors contributed equally to this work.

Abstract: Background: Ulnar nerve entrapment is one of the most common entrapment neuropathies, usually occurring in the cubital tunnel of the elbow and in Guyon’s canal of the wrist. However, it can also occur at other anatomical locations. Purpose: Our aim was to review other possible locations of ulnar nerve entrapment in an ultrasound and anatomical study. Material and Methods: Eleven upper limbs from eight adult corpses were ultrasonographically examined and subsequently dissected in a dissection laboratory. Four specific anatomical points were analysed, and any anatomical variations were documented. Moreover, six samples of the nerve were taken for histological analysis. Results: Distinct anatomical relationships were observed during ultrasound and dissection between the ulnar nerve and the medial intermuscular septum, the triceps aponeurosis, Osborne’s fascia at the elbow, the arcuate ligament of Osborne and the intermuscular aponeurosis between the flexor carpi ulnaris and the flexor digitorum superficialis muscles. A statistical study showed that these locations are potential areas for ulnar nerve compression. In addition, a fourth head of the triceps brachii muscle was found in some specimens. Conclusion: Results demonstrate that ultrasound is a good tool to investigate ulnar nerve entrapment neuropathy and to identify other anatomical points where the nerve can remain compressed.

Keywords: ulnar nerve; nerve entrapment; compressive neuropathy; ultrasound; intermuscular septum; muscular fascia; flexor carpi ulnaris; flexor digitorum superficialis



Citation: Ferre-Martinez, A.; Miguel-Pérez, M.; Möller, I.; Ortiz-Miguel, S.; Pérez-Bellmunt, A.; Ruiz, N.; Sanjuan, X.; Agullo, J.; Ortiz-Sagrà, J.; Martinoli, C. Possible Points of Ulnar Nerve Entrapment in the Arm and Forearm: An Ultrasound, Anatomical, and Histological Study. *Diagnostics* **2023**, *13*, 1332. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13071332>

Academic Editors: Anna Żurada and Mario Manto

Received: 7 February 2023

Revised: 21 March 2023

Accepted: 31 March 2023

Published: 3 April 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Entrapment neuropathies are a heterogeneous group of conditions in which peripheral nerves are chronically compressed or stretched as a result of congenital or acquired disorders or a combination of both [1]. Clinical symptoms depend on the degree and duration of entrapment. They can range from sensory abnormalities (pain, paraesthesia, and numbness) to motor weakness in the area innervated by the affected nerve [2–4]. For this reason, accurate clinical evaluations including history taking, physical examinations, and electrodiagnostic tests are the mainstays of diagnosis. However, imaging studies have an important role in identifying the abnormality causing the entrapment neuropathy [2].

As for mononeuropathies, ulnar neuropathy is most often due to compression at different fibro-osseous tunnels locations as the cubital tunnel of the elbow and the Guyon’s canal of the wrist [4,5] or congenital conditions involving accessory muscles [1]. However,

ulnar nerve entrapment can occur at other sites in the mid-arm to distal elbow and could have other aetiologies that can increase the risk of nerve compression.

The ulnar nerve (UN) arises from the medial cord of the brachial plexus (C8, T1) and courses along the medial side of the brachial artery in the anterior compartment of the proximal aspect of the arm [2]. It enters the posterior compartment of the arm, crossing the medial intermuscular septum (IMS) from the front to the back [6]. The IMS is a fibrous band that blends with the distal coracobrachialis tendon at the mid-shaft of the humerus and inserts into the medial epicondyle distally [7]. At the level of the elbow, and posteriorly, the UN courses through the epitrochlear tunnel of the elbow, an osteofibrous tunnel composed by the olecranon laterally and the medial epicondyle medially. In fact, the medial epicondyle posteriorly forms a groove through which the ulnar nerve passes and surrounds it partially by its anteromedial side [2,7,8]. The floor of this tunnel is composed of the posterior band of the ulnar collateral ligament [6,8–10], while the roof is composed of a fascial sheet also known as Osborne's fascia [11]. Posteriorly, the nerve enters the hiatus between the ulnar and humeral heads of the flexor carpi ulnaris (FCU) muscle. The two heads of this muscle are connected by an aponeurotic arch, i.e., the arcuate ligament of Osborne [10], which represents a distal expansion of the cubital tunnel retinaculum [11]. Distally, the nerve dives below the FCU to enter the fascial sleeve of the flexor digitorum superficialis (FDS) muscle [12]. It runs between the FDS and the FCU until it reaches the wrist, where it passes through Guyon's canal and bifurcates into the sensory and motor terminal branches [5,7].

To evaluate the structural aetiology of nerve entrapment, imaging studies can be very useful [2]. Among them, ultrasound (US) is a reliable method for evaluating the anatomy and structures causing nerve compression [13,14]. In fact, US can detect UN instability in a dynamic way [15] as well as assess other anatomical structures [16–18].

The aim of this study was to obtain good anatomical knowledge of the UN and its pathway through the arm and forearm, taking into consideration its relationships with other anatomical structures as well as any anatomical variations. This can identify multiple potential sites where the nerve may be compressed, thereby facilitating the diagnosis of entrapment neuropathy by US.

2. Material and Methods

This study was conducted on eleven upper limbs (four right upper limbs and seven left upper limbs) obtained from eight adult corpses cryopreserved at 20 °C in the Dissection Laboratory of the Faculty of Medicine and Health Sciences at the University of Barcelona. Among the corpses, six were male (55%), and five were female (45%). The age of the corpses ranged from 65 to 89 years. Specimens were enumerated gradually during the US and anatomical studies. The axillary artery was injected with black latex (Latex Compound Española S.A., Sadabell, Spain) to facilitate its localisation in the US and anatomical studies. Cadavers whose upper limbs were deformed by malformations, traumas, or scars due to surgery history were excluded. Thus, the US study was performed first, followed by the anatomical study, where all the upper limbs were dissected carefully, and then the histological analysis.

2.1 Ultrasound Study

The US study was performed with a LOGIQ P6 and P9 ultrasound system (GE ultrasound Korea. LTD. Seongnam, Republic of Korea) and a high-frequency lineal transducer of 6–15 MHz. The UN was studied from its origin at the medial cord of the brachial plexus to its terminal bifurcation at the level of the pisiform bone. First, it was visualised along the transversal axis. Once the nerve was identified, it was followed in the axial images obtained during the alternating cranial and caudal displacement of the transducer. After the assessment in the transverse plane, the nerve was examined in the longitudinal images. During the movement of the transducer along the transverse plane, changes into the morphology and echogenicity of the nerve as well as the appearance of its surrounding

structures were explored. Then, longitudinal US studies were performed to verify any portion of the nerve that was suspicious to be compressed. At all times, the possible presence of anatomical variations was taken into consideration as they could explain UN entrapment.

Four specific locations were evaluated, as they were considered notable points for nerve entrapment (Figure 1): (1) the middle third of the arm, where the nerve crossed into posterior compartment through the IMS; (2) the lower third of the arm, where the nerve is associated with the medial head of the triceps; (3) the level of the elbow, where the path of the nerve is associated with the hiatus between the ulnar and humeral heads of the FCU; and (4) the upper third of the forearm, where the nerve passes through an intermuscular aponeurosis between FCU and FDS.

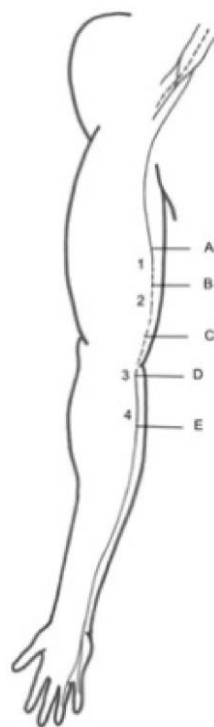


Figure 1. Numbers from 1 to 4 indicate the four specific locations of possible ulnar nerve entrapment to evaluate. Letters from A to E correspond to the anatomical landmarks where the nerve's diameter and perimeter measurements were taken.

With the panoramic views of the studied areas obtained with the US transverse plane, an intramuscular needle was used to identify all these anatomical locations to confirm the correct position in the dissection study.

1.1. Anatomical Study

An anatomical study was carried out with a careful dissection of the UN along its entire path. At all times, the intramuscular needles placed during US were used as the landmarks of the UN at the specific points mentioned above. First, a longitudinal skin incision at the anteromedial aspect of the arm, from the axilla to the elbow, was made. Then, two terminal horizontal skin incisions were made: the first one at the level of the axilla and the second one at the level of the elbow. The skin was removed, and the entire superficial fascia was dissected. Once the UN was identified at its origin at the medial cord of the brachial plexus, it was dissected thoroughly along its path up to its entrance into the osteofibrous tunnel at the elbow. We paid special attention to its passage through the IMS and to its relationship with the medial head of the triceps brachii in the posterior compartment. The epineurium of the nerve was preserved constantly.

Hereunder, a second longitudinal skin incision at the anteromedial aspect of the forearm, from the elbow to the wrist, and a third horizontal skin incision at the wrist were

made. Again, the skin was removed, and the superficial fascia was dissected. The UN was released from the osteofibrous tunnel. Then, it was followed along its path from underneath the aponeurotic arch that joins the two heads of the FCU (with special attention paid to its relationships with the FCU and FDS muscles) to the wrist.

During the dissection of the nerve along its entire course in the arm and forearm, its anatomical relationships with the other structures were studied, while iconographic information (Canon EOS 60D) was recorded. The exact anatomical positions of the intra-muscular needles were also verified. Finally, the diameter and perimeter studies of the nerve were performed with a digital calliper and a thin thread, respectively. The four specific anatomical locations studied by US were used as the anatomical landmarks to carry out these measurements. Thus, the diameter and perimeter were measured at (Figure 1):

- (A) Two centimetres proximal to the IMS, the first anatomical landmark studied by US [1];
- (B) Two centimetres distal to the IMS, the first anatomical landmark studied by US [1];
- (C) Three centimetres proximal to the medial epicondyle (ME), the second anatomical landmark studied by US [2];
- (D) Before the traversing below the hiatus between the two heads of the FCU, the third anatomical landmark studied by US [3];
- (E) After the piercing of the intermuscular aponeurosis between the FCU and FDS, the fourth anatomical landmark studied by US [4].

2.2 Histological Study

From three upper limbs, six samples (2.2 cm) of the UN and its surrounding anatomical structures from the anatomical landmarks studied were obtained to carry out a histological study. One of the samples corresponded to the nerve being in association with a muscle variation found during the study.

All of the samples were fixed in 4% formaldehyde and processed until paraffin blocks were obtained. Then, they were cut into 4 µm slices and subjected to haematoxylin-eosin and Masson's trichrome staining for histological analysis. The samples were analysed by the 3DHISTECH Panoramic 1000 scanner, and images were constructed with CaseViewer 2.4 for Windows.

2.3 Statistical Study

All data were processed with Excel and SPSS 26. Qualitative variables were summarised as proportions. The concordance index (interclass correlation coefficient (ICC)) of the different measurements (nerve perimeter and diameter) was calculated for each anatomical point studied. If optimal ICC values were obtained, they were averaged and presented as the median or mean with their respective measures of dispersion.

The existence of statistically significant differences when comparing nerve diameters at the different anatomical points studied was determined using a median comparison test: Friedman's test with Bonferroni correction. Moreover, for each of the points where significant differences were found, the theoretical perimeter of the circumference was calculated from the observed diameter. Later, it was compared with the real observed perimeter by Student's *t*-test, with the aim of seeing if these measurements were comparable.

3 Results

3.1 Ultrasound and Anatomical Studies

The US study of the arm and forearm allowed us to identify the UN along its entire path in all the upper limbs. On the transverse scans, it appeared as an echogenic tubular structure containing hypoechogenic/anechoic discontinuous segments. On the longitudinal scans, it was identified as a homogeneous echogenic structure. This accuracy of the US technique enabled the placing of the intramuscular needles at specific points, as described in the methods.

The UN diverged from the brachial artery both posteriorly and medially and kept sliding on a self-contained membranous sheath at the medial aspect of the arm.

At the first anatomical landmark, the dissection study showed that the UN crossed the IMS to enter the posterior compartment and was accompanied by the superior ulnar collateral artery, which was identified in 100% of the upper limbs. The superior ulnar collateral artery was also identified in all the limbs in the US study as an anechoic oval structure (because it was injected by latex) emerging as a branch of the brachial artery.

The US transverse images showed the IMS to be a thin hyperechoic continuous line, while the longitudinal images showed it to be an echogenic continuous echoic band that interrupted the continuity of the nerve (Figure 2A). The US transverse images showed that the direction of the nerve became notably modified while crossing beneath the IMS, although the internal morphology of the nerve was preserved in most specimens. The dissection study revealed the UN as crossing the medial IMS (Figure 2B) that extended from the lower part of the crest of the lesser tubercle of the humerus to the medial epicondyle. Anatomically, the location of the intramuscular needles corresponded to the point at which the UN pierced this IMS in 91% of the upper limbs studied.

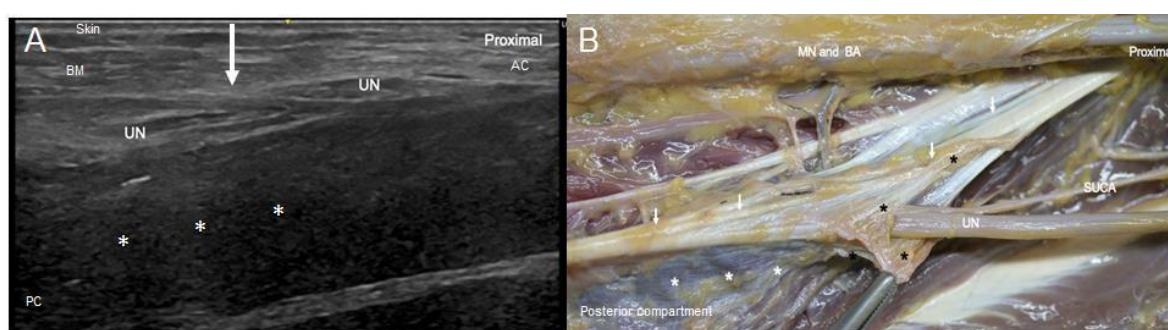


Figure 2. (A) US image in longitudinal axis of the ulnar nerve (UN) at the middle third of the arm. IMS is marked with a white arrow. The skin (SK), the anterior compartment (AC) with brachial muscle (BM), and the posterior compartment (PC) with the triceps brachii muscle (white asterisks) are indicated. The hypoechogenicity of this last muscle is due to the position of the probe to focus the UN and the septum. (B) Anatomical view of the UN crossing beneath the medial IMS (arrows), accompanied by the superior ulnar collateral artery (SUCA). We used a surgical clamp to pull the collagen fibres that make up the IMS (black asterisks). It is shown that, once in the posterior compartment, the UN remained covered by the medial head of triceps brachii muscle (white asterisks), which was inserted into the whole length of the IMS.

At the second anatomical landmark, 2 cm after the IMS, the UN was identified by US as resting on an echoic mass, which corresponded to the medial head of the triceps brachii, coinciding with the anatomical findings. The UN remained attached to the muscle belly by its epimysium in the posterior compartment (Figure 3). Before entering the osteofibrous tunnel in the elbow, the UN crossed an aponeurotic arch formed by the insertion of the brachial fascia into the medial epicondyle and olecranon.

In the elbow, when the UN pierced the osteofibrous tunnel, US images taken on the transverse axis showed it as a hyperechogenic structure covered by a well-differentiated hyperechogenic line that corresponded to the Osborne's fascia (Figure 4A), as confirmed by the dissection study later, where it was seen as a fascial sheet (Figure 4B). These findings were objectified in 82% of the specimens both in the US and anatomical studies. However, in the remaining 18% of the specimens, which corresponded to two upper limbs from the same donor, US study showed a hypoechoic structure occupying the osteofibrous tunnel that reminded us of a muscular structure (Figure 5A). Accordingly, the UN remained adherent to the medial osseous wall (medial surface of the olecranon) and showed itself as a heterogeneous anechoic oval structure surrounded by a hyperechogenic area. The hypoechoic structure originated from the medial surface of the olecranon and inserted into the medial epicondyle, passing over the medial head of the FCU. We observed that this muscle had a second insertion point in the medial IMS, which corresponded to the insertion

of the extension of the connective tissue covering the medial head of the triceps brachii. The dissection study revealed that this structure can be considered as an aberrant muscle mass (Figure 5B), and the UN was included in the epimysium of this muscular structure (Figure 5C). Moreover, we observed that the posterior branch of the inferior ulnar collateral artery accompanied the nerve through the osteofibrous tunnel, giving collateral branches to this muscle mass (Figure 6A). We also noted a nerve branch from the UN that innervated the FCU, providing collateral branches to innervate this muscular mass (Figure 6B). The presence of the aberrant muscle mass increased the compression of the nerve at this point, as the nerve could be anatomically seen to dilate in the lower third of the arm, proximally to the aberrant muscle mass. Moreover, the nerve in the upper limbs containing the aberrant muscle mass showed a larger diameter than those in the other upper limbs dissected. It should be noted that the UN recovered its fascicular morphology distally in the forearm.

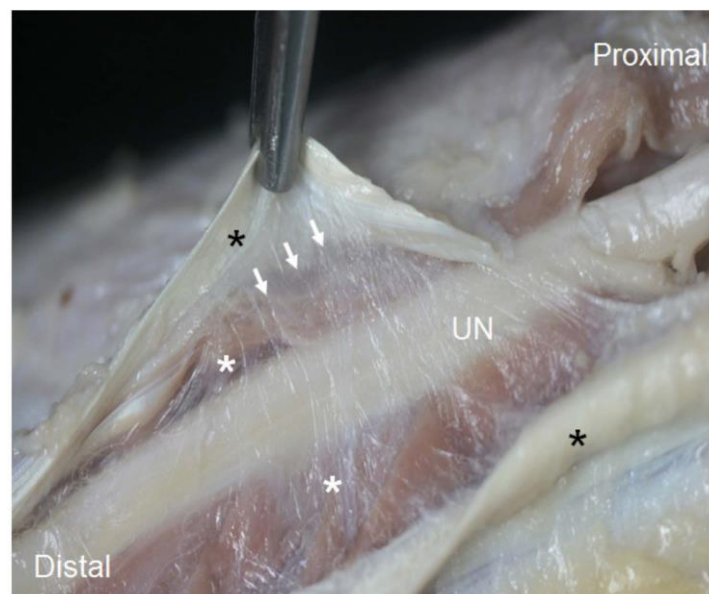


Figure 3. The UN in arm's posterior compartment, after it crosses beneath the medial intermuscular septum. The white arrows mark the triceps brachii muscle's epimysium in which the UN is involved, remaining attached to the medial head of triceps brachii (white asterisks). The black asterisks mark the membraniform tendon of this muscle, which has already been dissected.

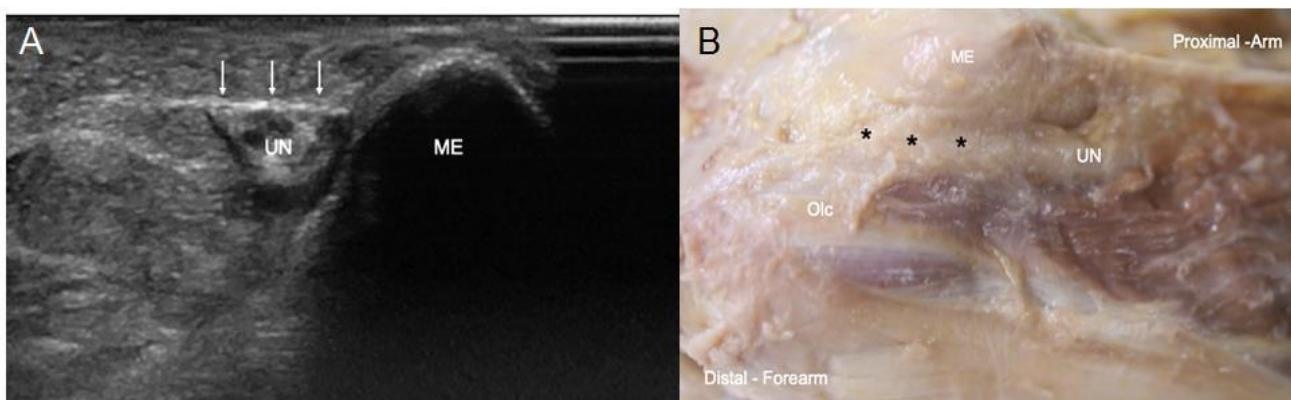


Figure 4. (A) US view of the UN at the osteofibrous tunnel covered by Osborne's fascia (white arrows), laterally to the medial epicondyle (ME) (B) Anatomical view of the Osborne's fascia marked with black asterisks and the UN passing between the olecranon (Olc) and the medial epicondyle (ME).

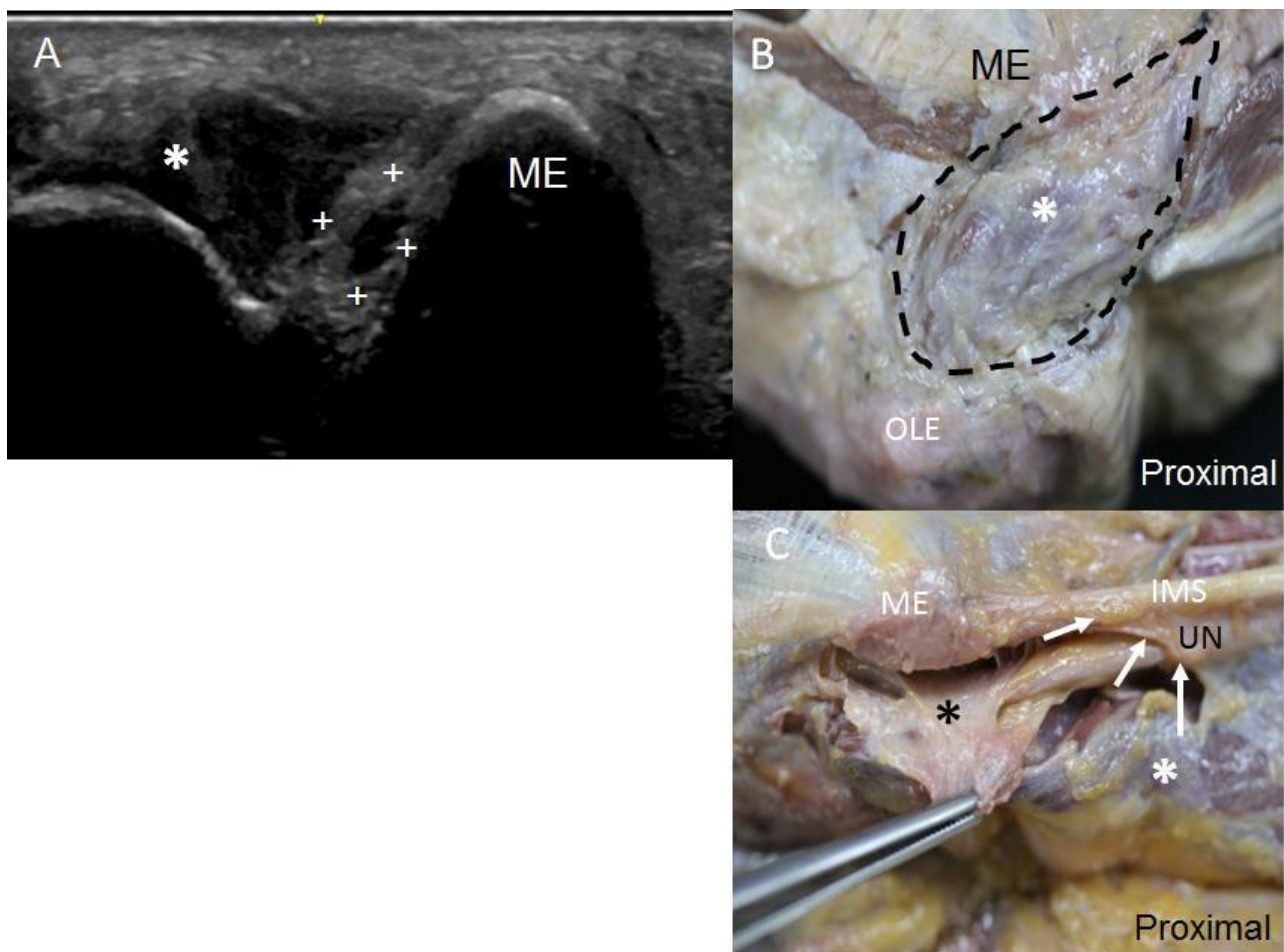


Figure 5. (A) Osteofibrous tunnel occupied by a muscular variant (white asterisk), which pressed the UN (white crosses) towards the medial wall of medial epicondyle (ME). It is shown that the UN appears as an oval anechoic structure, as it has lost its internal fascicular morphology. (B) Anatomical view of the muscular variant in the elbow delimited by intermittent black line. It is shown that it originated from the medial aspect of the olecranon (OLE) and is inserted into the medial epicondyle (ME). (C) The UN at the osteofibrous tunnel is included in the epimysium of this muscular variant (black asterisk), which was dissected from its multiple insertions. A white asterisk marks the medial head of triceps brachii. Finally, it is shown that the UN, before entering the osteofibrous tunnel of the elbow, crosses beneath an aponeurotic arch (white arrows) formed by the extension of connective tissue that covers the triceps brachii and is inserted into the intramuscular septum (IMS).

Apart from these findings, when we studied signs of nerve compression in the elbow by US, we found that in 82% of the upper limbs studied, the nerve showed a focal homogeneous hypoechoic appearance, with loss of its normal internal fascicular pattern. In 55% of these specimens, the dissection study revealed feasible dilation of the nerve before its entrance into the osteofibrous tunnel. In one of them, the nerve was found rotated on its own axis once in the cubital tunnel of the elbow.

In the forearm, where the UN associates with the two heads of FCU (third anatomical landmark), the UN remained on a superficial plane that could be observed in the US (Figure 7A) and dissection studies (Figure 7B). In both studies, the UN was observed as a flattened nerve that recovered its oval structure distally. In the US study, the nerve was surrounded by a hyperechogenic area that, in the anatomical study, corresponded to the epineurium of the nerve anteriorly and to the extension of the internal aponeurosis of the FCU posteriorly.

The US study showed that at the third anatomical landmark, the UN preserved its internal fascicular structure in 63% of the upper limbs, while in 11% of the specimens, we had difficulties in identifying it and defining its morphology. The arcuate ligament of Osborne was well identified by US in only 18% of the specimens, appearing as a thin hyperechogenic line covering the UN. Anatomically, this ligament was observed as several fibrous bands that connected the two heads of the FCU to one another, forming an arch under which the UN moved distally in the forearm, which could then be used to locate the muscle bellies of the FCU and FDS at a deeper plane (Figure 7B).

These findings were different from those observed in the upper limbs containing the aberrant muscle mass, in which the lateral head of the FCU originated from the superficial surface of the olecranon and the deeper surface of the aberrant muscle epimysium instead of originating from the medial surface. We could see by US that this aberrant muscle mass covered the lateral head of the FCU proximally. Due to this anatomical arrangement of the muscles, the UN was mostly covered by the medial head of the FCU at its exit from the osteofibrous tunnel in the elbow.

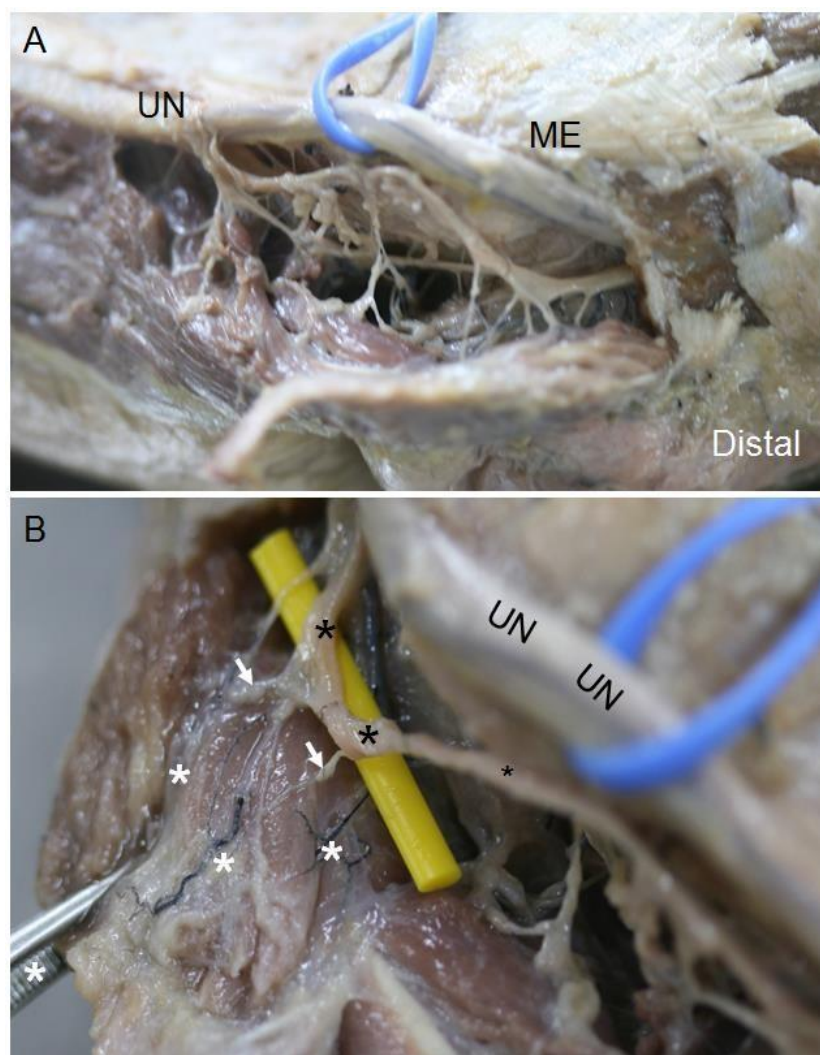


Figure 6. (A) Anatomical view of the ulnar nerve giving branches to the aberrant muscle at the level of the medial epicondyle (ME). (B) Collateral arteries (white asterisks), which originated in the posterior branch of the inferior ulnar collateral artery. At the very rear of the osteofibrous tunnel, the posterior ulnar recurrent artery accompanies the ulnar nerve (UN) at its path through the elbow. The white arrows indicate the nerve branches responsible for innervating this muscular variant, which originates in a UN branch (black asterisks).

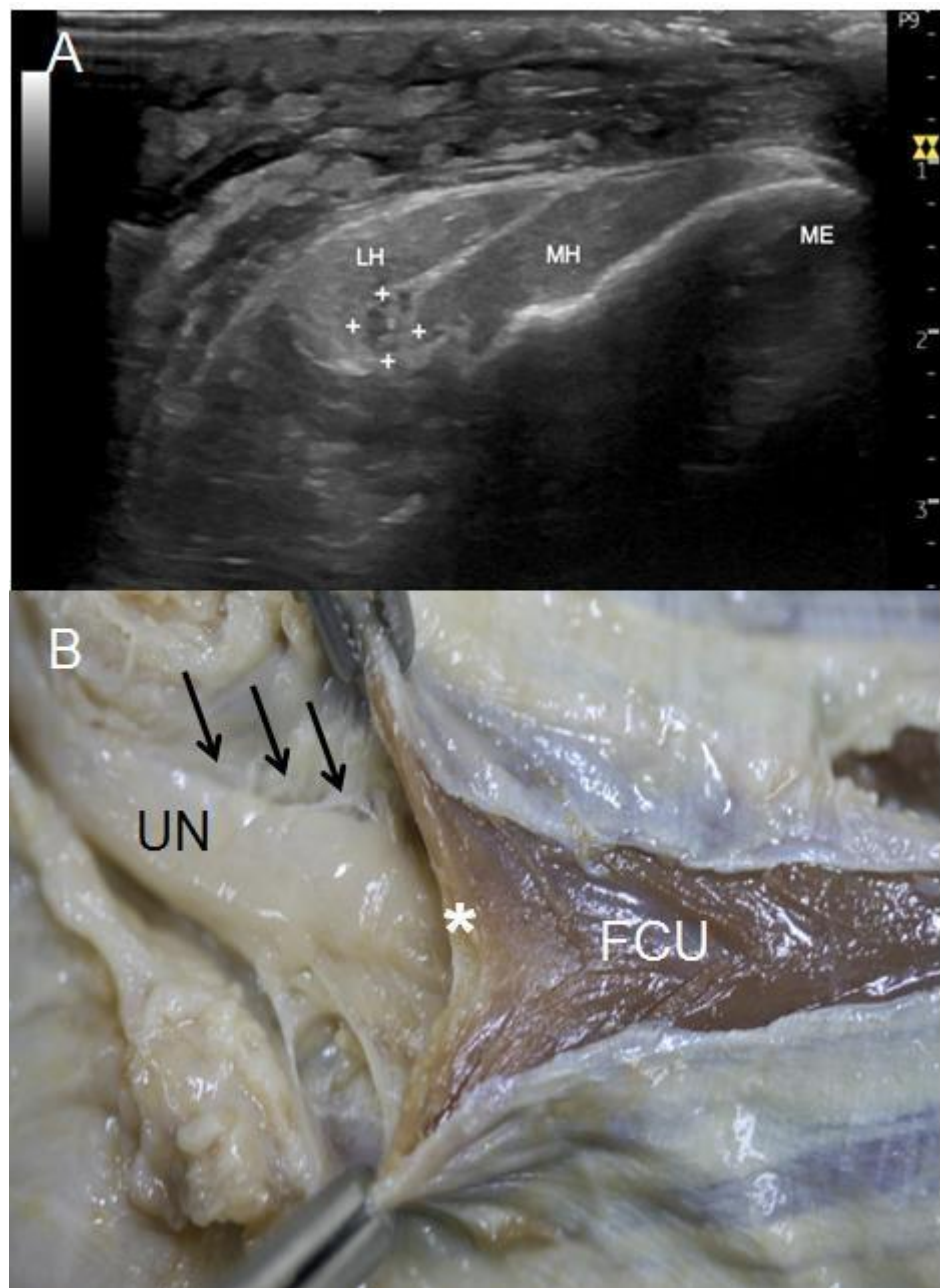


Figure 7. (A) US view of UN (white crosses) at its exit from the osteofibrous tunnel of the elbow, crossing between medial (MH) and lateral (LH) heads of flexor carpi ulnaris. (B) Anatomical view of the UN at this point. It is shown how it crosses beneath the Osborne's ligament (white asterisk), which connects both heads of the flexor carpi ulnaris (FCU). In addition, note that the UN remains attached to the FCU's epimysium (black arrows).

As the UN travelled distally through the forearm, the US study showed that it associated with muscle bellies of the FCU medially and superficially and the FDS laterally and posteriorly (Figure 8A). Both muscles were identified as an oval echoic structure around the UN that simultaneously was surrounded by a hyperechogenic area. This area corresponded to the fourth anatomical landmark: the intermuscular aponeurosis between the FCU and FDS, as confirmed later in the dissection study. A detailed dissection revealed that this aponeurotic structure was composed of tendinous fibres from the FDS that originated from the aponeurosis of the FCU (Figure 8B). It was constant in all the specimens, although the intramuscular needle located at this point coincided in 82% of the upper limbs studied. The

remaining 18% corresponded to the upper limbs containing the aberrant muscle mass, in which the structures surrounding the UN at this location were difficult to delimitate.

At this fourth anatomical landmark, the UN paved its way through the forearm, including the epimysium of the FDS as well as the FCU and its longus tendon reaching the pisiform bone. These findings correlated with the ones obtained by US, although the exact point where the UN pierced the muscle epimysium was difficult to identify by US.

Regarding signs of nerve compression in the forearm in the US study, the morphology of the UN was preserved in 82% of the upper limbs. In the remaining 18% of the specimens, the nerve was visualised as an anechoic oval structure. Some of the differences in the nerve diameter and perimeter observed between the different anatomical points in the anatomical study were corroborated by the statistical study.

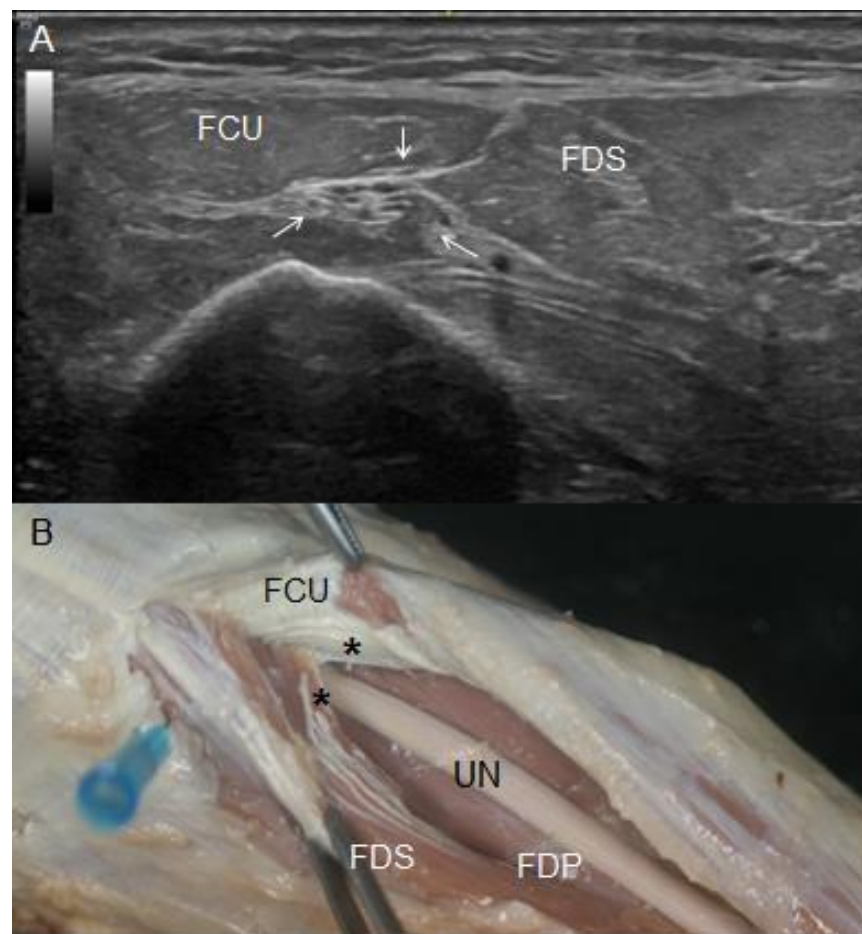


Figure 8. (A) Ultrasound view of the UN (white arrows) between the FCU and flexor digitorum superficialis (FDS) at the upper third of the forearm. (B) Anatomical view of the UN at this very point of the forearm. Note how it crossed beneath an aponeurotic structure (black asterisk), compressing the insertion of tendinous fibres of the FDS on the FCU muscle fibres. In this figure, UN was dissected from the FDS's epimysium in which it was included, and it rests on FDP muscular mass.

3.2 Histological Study

A double-blind histological study was performed. Samples of the UN from the limbs containing the aberrant muscles mass were subjected to haematoxylin-eosin (Figure 9A) and Masson's trichrome staining (Figure 9B) and were shown to present concentric fibrosis. These findings were not observed in the other samples analysed, which showed no significant or pathological changes (Figure 9C,D).

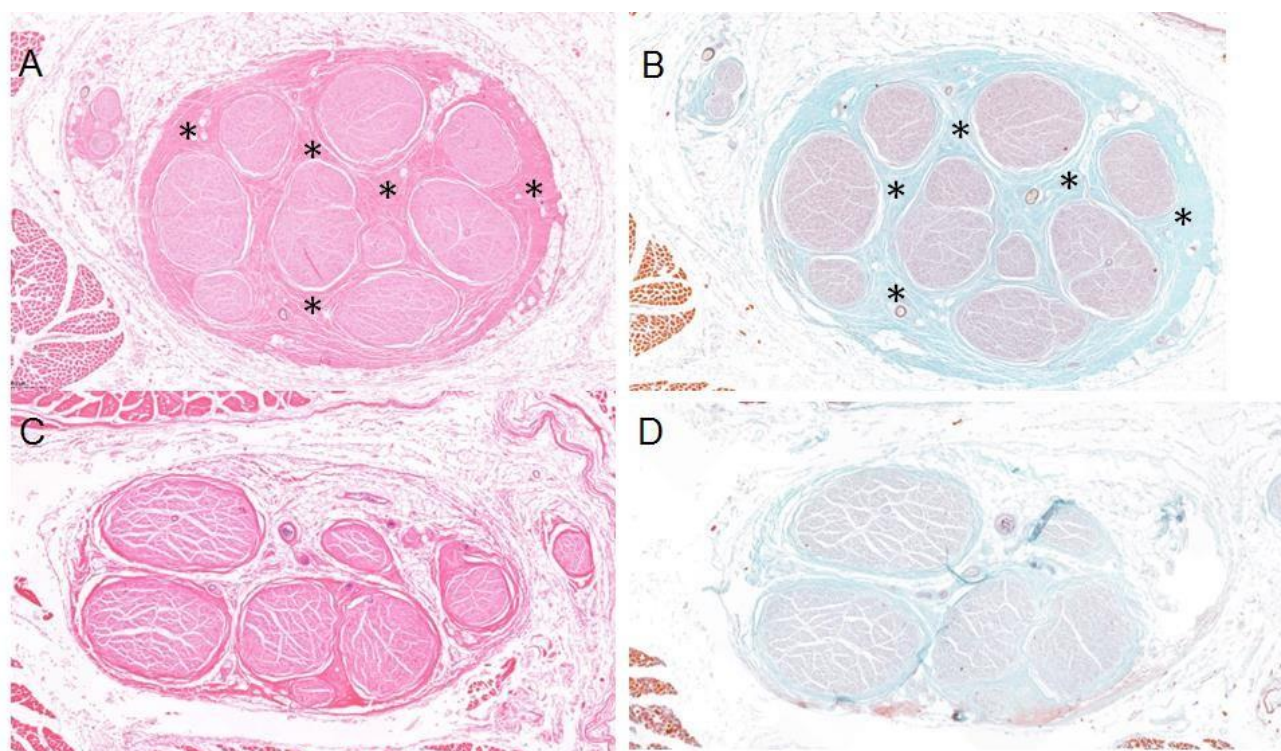


Figure 9. Histology samples of the UN in relation to the muscular variation and the fibrous tissue (black asterisks) can be observed between nerve fascicles (NF) as a sign of chronic extrinsic compression, stained with haematoxylin-eosin (A) and with Masson's trichrome (B). Histology samples of the UN stained by haematoxylin-eosin (C) and Masson's trichrome (D) without signs of fibrosis.

3.3 Statistical Results

As mentioned in the Material and Methods, we first analysed the concordance indexes (interclass correlation coefficient (ICC)) using the nerve diameter and perimeter values to determine the level of consistency between them (Table 1). As a result, our variables were presented as the mean (standard deviation) or median (interquartile range).

Table 1. Diameter and Perimeter's ICC in each anatomical landmarks studied.

Means	ICC	95% CI	F Test (<i>p</i>)
Perimeter	0.950	0.898–0.983	19.588 (0.000)
Diameter	0.642	0.250–0.885	2.795 (0.003)

Interpretation: <0.40 poor; 0.40–0.59 sufficient; 0.60–0.74 good; 0.75–1 excellent.

To determine the normality of the distribution, the Shapiro–Wilk test was used (Table 2). To study the existence of differences between the diameter and perimeter measurements, a Friedman's test with Bonferroni correction was applied (Table 3).

Table 2. Descriptive statistics.

Anatomical Landmarks	Perimeter				Diameter			
	Mean (SD)	IC 95%	Median (IQR)	Shapiro–Wilk (<i>p</i>)	Mean (DE)	IC 95%	Median (IQR)	Shapiro–Wilk (<i>p</i>)
A	15.54 (1.08)	14.85–16.22	15.65 (1.93)	0.254	4.25 (0.33)	4.03–4.48	4.33 (0.426)	0.055
B	14.83 (0.94)	14.23–15.43	15.01 (1.55)	0.873	3.94 (0.66)	3.50–4.38	3.66 (0.96)	0.473
C	16.94 (1.42)	16.04–17.84	16.95 (1.79)	0.481	5.26 (1.14)	4.5–6.02	4.93 (1.272)	0.097
D	16.73 (0.93)	16.14–17.32	16.73 (0.97)	0.641	5.46 (0.75)	4.96–5.97	5.58 (0.948)	0.636
E	13.52 (1)	12.88–15.16	13.27 (1.84)	0.257	3.83 (0.35)	3.6–4.06	3.75 (0.306)	0.535

Table 3. Statistical hypothesis testing.

Friedman Test	N Total	F	p
Perimeter	12	37.867	0.000
Diameter	11	25.673	0.000

Figure 10 illustrates the anatomical points where we found statistically significant differences when comparing the nerve diameter and perimeter among the four anatomical landmarks. We set 0.05 as the level of significance. All the significant values shown in Figure 10 were adjusted with Bonferroni correction.

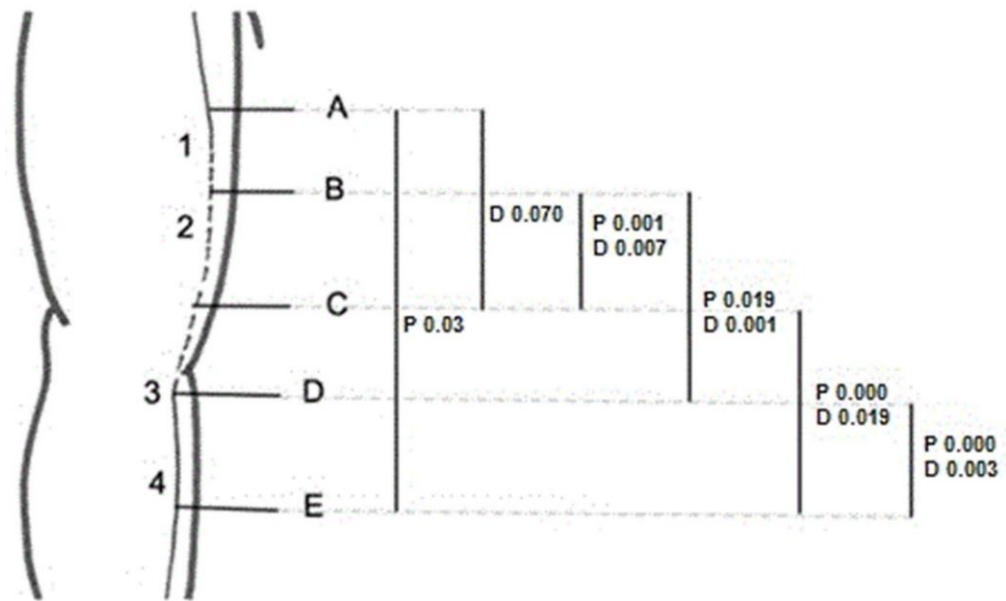


Figure 10. We found statistical significant differences when comparing nerve perimeter between A and E; nerve diameter between A and C; and nerve diameter and perimeter between B and C, B and D, C and E, and D and E.

To compare the nerve diameter and perimeter measurements, we first estimated the nerve circumference using the nerve diameter measurements. As seen in Table 4 and Figure 11, there were no statistically significant differences between the observed nerve perimeter and its estimated circumference. Thus, although it is known that the nerve perimeter is more reliable for studying nerve dimensions, it is comparable to the nerve diameter and the nerve circumference estimated from it.

Table 4. Comparison between nerve's diameter and perimeter measurements.

	A	B	C	D	E	Mean (DS)	Difference	IC 95% Difference	t-Statistic (p)
Perimeter	15.65	15.01	16.95	16.73	13.27	15.522 (1.68)			
Circumference	13.60	11.50	15.49	17.53	11.78	13.98 (1.29)	−1.54	(3.73, 0.64)	−1.627 (0.142)
Diameter	4.33	3.66	4.93	5.58	3.75	4.45 (0.41)			

Ulnar nerve perimeter with the estimated nerve circumference
based on nerve diameter (mm)

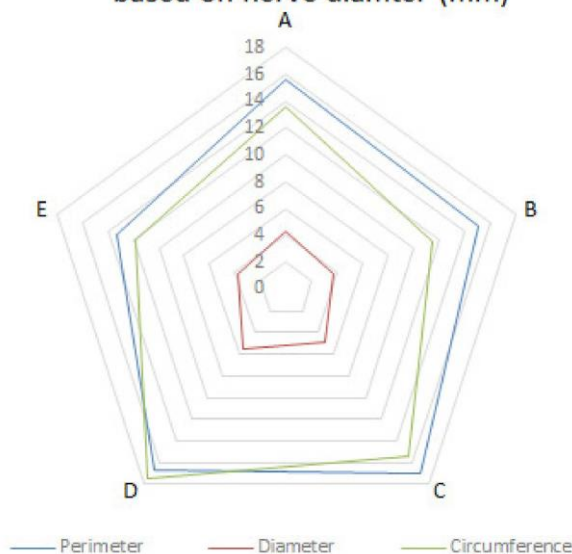


Figure 11. Ulnar nerve perimeter in comparison to the theoretical perimeter of the circumference calculated from the observed diameter.

4 Discussion

Our results were in line with those of other studies showing that high-definition US can be used for a dynamic evaluation of UN integrity and its relationship with other anatomical structures in the arm and forearm [1,2,4,5,13,19–21]. Moreover, US can detect the presence of anatomical variations, which would explain the aetiology of nerve entrapment at specific anatomical locations. Therefore, US is a good tool for making good diagnosis as well as for planning appropriate treatments.

Previous US studies have reported that nerve pathological changes consist of a thinned nerve with proximal fusiform swelling and an increase in its hypoechogenicity, which entails a loss of its normal fascicular pattern [1,4,13,20,21]. It should be noted that an earlier study observed nerve enlargement distally to the compression site, although this is a rare finding [1]. US allowed us to identify these same changes specific anatomical points. US images taken along the longitudinal axis helped identify the critical points of compression by showing the nerve proximal and distal regions of the nerve from one exact point simultaneously with other methods, especially electrodiagnostic studies. Although changes in the external morphology of the nerve could not be observed, as no measurements of the cross-sectional area of the nerve were taken, given that it was not the aim of our study, we could discern changes in its fascicular morphology, which we interpreted as signs of compression. However, some studies have reported that the nerve can show a focal homogeneous hypoechoic appearance in normal subjects at sites where the nerve is subjected to chronic physiological compression, such as in the osteofibrous tunnel of the elbow [1].

In the dissection study, we observed that the UN diverged from the brachial neurovascular bundle in the anterior compartment, surrounded by its own sheath that was different from the one surrounding the other neurovascular structures. As the nerve moved distally, it pierced the IMS from the anterior compartment to enter the posterior compartment of the arm. This anatomical point correlates with what several authors describe as the arcade of Struthers, a fibrous canal consisting of the medial head of the triceps brachii and its aponeurotic expansion extending into the IMS as well as the internal brachial ligament described as a white, cord-like band [22–25]. However, the arcade of Struthers is a controversial structure, as some authors believe that it does not exist and is instead an anatomical variation of the medial IMS [7,23,26]. In accordance with those authors, and

as we have described in this study, the IMS extends from the lower part of the crest of the lesser tubercle to the medial epicondyle, allowing the insertion of the triceps brachii and brachialis muscles. In our study, we also observed that the UN does not always cross directly beneath the IMS but can change its direction. Thus, these findings should be taken into consideration during surgical interventions.

In the posterior compartment, the UN was directly associated with the medial head of the triceps brachii being included in its epimysium. Some studies describe this nerve arrangement as a muscular channel formed of the triceps brachii through which the UN runs in the posterior compartment [26]. However, in some specimens, we noticed that the UN was directly associated with an extension of connective tissue that covered the nerve itself and the medial head of the triceps brachii as an aponeurosis while being attached to the whole length of the IMS. Anatomically, this tissue could also be defined as an extended membrane-like tendon. Despite this, it seems that the relationship between the UN and the triceps brachii protects the nerve from extrinsic compression, as there were no signs of nerve compression at this point. However, it should be noted that a hypertrophic muscle could explain nerve entrapment syndrome and/or nerve luxation in the elbow, as has been reported in some studies [17,27,28]. Conversely, we observed a direct association of the UN with the deep aponeurosis in triceps brachii muscle atrophy.

According to most studies, cubital tunnel syndrome involving the elbow and Guyon's canal compression involving the wrist are the most common aetiology of ulnar neuropathy [4,5]. However, it should be pointed out that anatomical variations in the osteofibrous tunnel, such as the presence of accessory muscles, although infrequent, can be responsible for nerve entrapment.

Accessory muscles can be detected as incidental findings during routine US. Compared with MRI, US has the advantage of providing dynamic examinations that can show increases in muscle thickness and impingements on the UN, as we demonstrated with our upper limbs specimens [14].

Initially, when we identified the presence of an aberrant muscle mass occupying the osteofibrous tunnel in the US study, we interpreted it as the anconeus epitrochlearis muscle, which Testut and Latarjet described as a small muscle that extends transversally from the epitrochlear recess to the olecranon [6]. However, its dissection revealed the presence of an additional slip of the triceps brachii muscle, as it emerged from the lower part of the medial IMS and medial epicondyle, before attaching itself to the medial surface of the olecranon. This description coincides with the one provided by previous studies, which define it as a fourth head of the brachial triceps muscle [16]. There are a few reports in the literature referring to additional heads of the brachial triceps that have different origins such as the posterior aspect of the surgical neck of the humerus [27] or the proximal part of the humerus [18]. According to these studies, such additional slips may dynamically compress the UN at the level of distal humerus, consequently causing ulnar neuropathy around the elbow area. It could also explain the snapping triceps syndrome, which is described by some authors as a dynamic condition in which the muscle portion of the triceps dislocates the UN over the epicondyle, causing instability of the nerve [15,29]. Accordingly, our histological study confirmed fibrosis of the nerve that was associated with the presence of the aberrant muscle mass. This corroborates the importance of considering its existence in clinical practice. Furthermore, we described in detail the vascularity and innervation of this additional slip of the triceps brachii in the Section 3. Knowledge of these variations is very important in obtaining a precise diagnosis and treating UN neuropathy properly. Therefore, in the presence of these anatomical variations, a transposition of the nerve would not be the best surgical option, as it would worsen the symptoms.

Regarding the changes in nerve size, it should be pointed out the UN decreases when examined from the proximal to the distal end due to branches leaving the main nerve trunk. Likewise, the UN does not provide any collateral branch in the arm, while it supplies numerous branches in the elbow and forearm. Thus, size changes at this level might indicate signs of nerve entrapment. The statistical study of the nerve diameter and

perimeter measurements confirmed that there were significant changes in the size of the UN in the posterior compartment of the arm and before and after its piercing of the osteofibrous tunnel in the elbow. However, when we compared the nerve diameter and perimeter before and after the crossing of the IMS, there were no statistically significant differences. As a result, we conclude that although the anatomy of this region and the path of the nerve in it increase the possibility of nerve compression at this point, the results from the statistical study do not prove this. Moreover, the histological study did not show pathological signs of compression in the posterior compartment.

However, we postulate that the upper third of the forearm is a critical area for the UN, as it is associated with several structures that can contribute to its compression, although most studies agree that UN entrapment occurs rarely in the upper forearm below the cubital tunnel [29]. Nevertheless, we observed that the UN becomes flattened when it pierces between the two heads of the FCU in 82% of the upper limbs dissected. Moreover, the statistical study confirmed significant differences in the diameter and perimeter between this point and a distal point in the forearm. Although it can be a potential site of compression, this enlargement at the exit of the nerve from the osteofibrous tunnel could be due to its disposition on a surface plane, as the histological study did not show pathological signs of compression in this area.

After associating with Osborne's ligament and, straight after, the belly of the FCU, the UN pierced the intermuscular aponeurosis between the FCU and FDS. Some studies have reported that this aponeurotic structure could compress the UN below the cubital tunnel [29]. We did observe significant differences in the nerve diameter and perimeter before and after the crossing of this aponeurosis. However, the US study revealed no changes in the internal morphology of the nerve at this anatomical point.

As reported in some studies before, we noted that the nerve follows its path distally through the forearm below the FCU muscle and inside the epimysium of the FDS [30]. On the contrary, other studies report that the UN rests on the flexor digitorum profundus (FDP), remaining covered by its epimysium [6]. It was difficult to precisely observe these fascial structures by US, but it can help in the diagnosis by demarcating changes in the nerve.

5 Conclusions

US is a good imaging tool that can be used to make a complete diagnosis of ulnar nerve entrapment neuropathy, as it can reveal the path of the UN and its relationship with other anatomical structures, showing potential causes of nerve entrapment, such as the presence of additional muscles or other anatomical variations. Furthermore, this study demonstrated the existence of other potential anatomical locations of nerve compression apart from the most common ones. For this reason, it is important for surgeons and other specialists to know and be aware of them when assessing a patient in the consulting room or during the surgical procedure itself. Finally, future studies should analyse whether the area of the nerve measured by US is comparable with the area of the circumference calculated anatomically from measurements taken of the nerve diameter or perimeter. This could be used to verify the effectiveness of such a diagnostic test.

6 Limitations

The study had some limitations, as it was performed with a limited number of specimens. Thus, we cannot determine the real frequency of the anatomical variations. Another limitation was that we did not have the clinical history of the donors to confirm the clinical signs of nerve compression.

Author Contributions: Conceptualization, A.F.-M. and M.M.-P.; methodology, A.F.-M., M.M.-P., I.M., J.O.-S. and C.M.; validation, M.M.-P., I.M. and C.M.; formal analysis, A.F.-M., M.M.-P. and C.M.; statistical study, J.O.-S.; investigation, A.F.-M., M.M.-P., S.O.-M., N.R. and X.S.; writing—original draft preparation, A.F.-M., I.M., J.O.-S., A.P.-B. and J.A.; writing—review and editing, M.M.-P., I.M., A.P.-B.,

J.A. and C.M.; supervision, M.M.-P. and I.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose. This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and approved by the Ethics Committee from Universitat de Barcelona: Institutional Review Board (IRB00003099).

Informed Consent Statement: All the donators gave their consent in life to participate in the investigations and to publish the results and to contribute to teaching.

Data Availability Statement: The data presented in this study are available in the article.

Acknowledgments: Thank you so much to all the donators for their altruism.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Abbreviations

UN	Ulnar nerve
IMS	Intermuscular septum
FCU	Flexor carpi ulnaris
FDS	Flexor digitorum superficialis
FDP	Flexor digitorum profundus
ME	Medial epicondyle
Olc	Olecranon
US	Ultrasound

References

1. Bianchi, S.; Draghi, F.; Beggs, I. Ultrasound of the peripheral nerves. In *Clinical Ultrasound*, 3rd ed.; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2011; Volume 2, pp. 1158–1167. [\[CrossRef\]](#)
2. Miller, T.T.; Reinus, W.R. Nerve entrapment syndromes of the elbow, forearm, and wrist. *Am. J. Roentgenol.* **2010**, *195*, 585–594. [\[CrossRef\]](#)
3. Barrell, K.; Smith, A.G. Peripheral Neuropathy. *Med. Clin. N. Am.* **2019**, *103*, 383–397. [\[CrossRef\]](#)
4. Martinoli, C.; Bianchi, S.; Pugliese, F.; Bacigalupo, L.; Gauglio, C.; Valle, M.; Derchi, L.E. Sonography of entrapment neuropathies in the upper limb (wrist excluded). *J. Clin. Ultrasound* **2004**, *32*, 438–450. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
5. Shen, L.; Masih, S.; Patel, D.B.; Matcuk, G.R. MR anatomy and pathology of the ulnar nerve involving the cubital tunnel and Guyon's canal. *Clin. Imaging* **2016**, *40*, 263–274. [\[CrossRef\]](#)
6. Testut, L.; Latarjet, A. *Tratado de Anatomia Humana*, 9th ed.; Salvat Editores: Barcelona, Spain, 1990; pp. 1–1153.
7. Chadwick, N.; Morag, Y.; Smith, B.W.; Yablon, C.; Kim, S.M.; Yang, L.J.S. Imaging appearance following surgical decompression of the ulnar nerve. *Br. J. Radiol.* **2019**, *92*, 20180757. [\[CrossRef\]](#)
8. Michelin, P.; Leleup, G.; Ould-Slimane, M.; Merlet, M.C.; Dubourg, B.; Duparc, F. Ultrasound biomechanical anatomy of the soft structures in relation to the ulnar nerve in the cubital tunnel of the elbow. *Surg. Radiol. Anat.* **2017**, *39*, 1215–1221. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
9. De Maeseneer, M.; Brigido, M.K.; Antic, M.; Lenchik, L.; Milants, A.; Vereecke, E.; Jager, T.; Shahabpour, M. Ultrasound of the elbow with emphasis on detailed assessment of ligaments, tendons, and nerves. *Eur. J. Radiol.* **2015**, *84*, 671–681. [\[CrossRef\]](#)
10. Granger, A.; Sardi, J.P.; Iwanaga, J.; Wilson, T.J.; Yang, L.; Loukas, M.; Oskouian, R.J.; Tubbs, R.S. Osborne's Ligament: A Review of its History, Anatomy, and Surgical Importance. *Cureus* **2017**, *9*, 3–10. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
11. Martinoli, C.; Bianchi, S.; Gandolfo, N.; Valle, M.; Simonetti, S.; Derchi, L.E. US of nerve entrapments in osteofibrous tunnels of the upper and lower limbs. *Radiographics* **2000**, *20*, 199–213. [\[CrossRef\]](#)
12. Mahan, M.A.; Gasco, J.; Mokhtee, D.B.; Brown, J.M. Anatomical considerations of fascial release in ulnar nerve transposition: A concept revisited. *J. Neurosurg.* **2015**, *123*, 1216–1222. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
13. Gregoli, B.; Bortolotto, C.; Draghi, F. Elbow nerves: Normal sonographic anatomy and identification of the structures potentially associated with nerve compression. A short pictorial-video article. *J. Ultrasound* **2013**, *16*, 119–121. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Bianchi, S.; Della Santa, D.; Glauser, T.; Beaulieu, J.Y.; Van Aaken, J. Sonography of masses of the wrist and hand. *Am. J. Roentgenol.* **2008**, *191*, 1767–1775. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Kang, J.H.; Joo, B.E.; Kim, K.H.; Park, B.K.; Cha, J.; Kim, D.H. Ultrasonographic and Electrophysiological Evaluation of Ulnar Nerve Instability and Snapping of the Triceps Medial Head in Healthy Subjects. *Am. J. Phys. Med. Rehabil.* **2017**, *96*, e141–e146. [\[CrossRef\]](#)
16. Rao, M.; Somayaji, S.; Raghu, J.; Pamidi, N.; Swamy, R. Bilateral additional slips of triceps brachii forming osseo-musculo-fibrous tunnels for ulnar nerves. *Ann. Med. Health Sci. Res.* **2013**, *3*, 450–452. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

17. Shuttlewood, K.; Beazley, J.; Smith, C.D. Distal triceps injuries (including snapping triceps): A systematic review of the literature. *World J. Orthop.* **2017**, *8*, 507–513. [[CrossRef](#)]
18. Fabrizio, P.A.; Clemente, F.R. Variation in the triceps brachii muscle: A fourth muscular head. *Clin. Anat.* **1997**, *10*, 259–263. [[CrossRef](#)]
19. Beekman, R.; Visser, L.H. High-resolution sonography of the peripheral nervous system—A review of the literature. *Eur. J. Neurol.* **2004**, *11*, 305–314. [[CrossRef](#)]
20. Draghi, F.; Bortolotto, C. Importance of the ultrasound in cubital tunnel syndrome. *Surg. Radiol. Anat.* **2016**, *38*, 265–268. [[CrossRef](#)]
21. Caetano, E.B.; Sabongi Neto, J.J.; Vieira, L.A.; Caetano, M.F. The arcade of Struthers: An anatomical study and clinical implications. *Rev. Bras. Ortop.* **2017**, *52*, 331–336. [[CrossRef](#)]
22. Siqueira, M.G.; Martins, R.S. The controversial arcade of Struthers. *Surg. Neurol.* **2005**, *64*, 21–24. [[CrossRef](#)]
23. Von Schroeder, H.P.; Scheker, L.R. Redefining the “Arcade of Struthers”. *J. Hand Surg. Am.* **2003**, *28*, 1018–1021. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Wehrli, L.; Oberlin, C. The internal brachial ligament versus the arcade of Struthers: An anatomical study. *Plast. Reconstr. Surg.* **2005**, *115*, 471–477. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Gray, H. *Anatomy of the Human Body*, 20th ed.; Lewis, W.H., Ed.; Lea & Febiger: Philadelphia, PA, USA, 1918.
26. Athlani, L.; Delgove, A.; Dautel, G.; Casoli, V. Anatomy of the ulnar nerve in the posterior compartment of the upper arm: Relationships with the triceps brachii muscle. *Morphologie* **2020**, *104*, 85–90. [[CrossRef](#)]
27. Michael, A.E.; Young, P. Is triceps hypertrophy associated with ulnar nerve luxation? *Muscle Nerve* **2018**, *58*, 523–527. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Pripotnev, S.; White, C. Ulnar Nerve Neuropathy Secondary to “Snapping Triceps Syndrome”. *Plast. Surg. Case Stud.* **2017**, *3*, 2513826X17716452. [[CrossRef](#)]
29. Won, H.S.; Liu, H.F.; Kim, J.H.; Kwak, D.S.; Chung, I.H.; Kim, I.B. Intermuscular aponeuroses between the flexor muscles of the forearm and their relationships with the ulnar nerve. *Surg. Radiol. Anat.* **2016**, *38*, 1183–1189. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Ortiz-Miguel, S.; Miguel-Pérez, M.; Navarro, J.; Möller, I.; Pérez-Bellmunt, A.; Agullo, J.L.; Ortiz-Sagristà, J.; Blasi, J.; Martinoli, C. Compartments of the antebrachial fascia of the forearm: Clinically relevant ultrasound, anatomical and histological findings. *Surg. Radiol. Anat.* **2021**, *43*, 1569–1579. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

ARTÍCULO 3

Título: Compartimentos de la fascia crural: Hallazgos ecográficos, anatómicos e histológicos clínicamente relevantes.

Introducción: El síndrome compartimental es una urgencia quirúrgica que puede presentarse en cualquier parte del cuerpo y puede causar necrosis celular cuando se mantiene en el tiempo. Los defectos resultantes pueden afectar los nervios, las células musculares, el tejido óseo y otros tejidos conectivos dentro del compartimento y se debe realizar una fasciotomía. Las características anatómicas e histológicas de la pierna hacen más probable el síndrome compartimental agudo, crónico y de esfuerzo en la extremidad inferior. Por estas razones, el conocimiento de las características ecográficas, anatómicas e histológicas de la fascia crural puede ayudar en el tratamiento del síndrome compartimental de la pierna.

Hipótesis: El estudio ecográfico, anatómico e histológico de la fascia crural o profunda de la pierna facilitará su identificación ecográfica con finalidad clínica y terapéutica.

Objetivos: Estudiar la fascia crural o profunda de la pierna ecográfica, anatómica e histológicamente y su relación con determinados músculos y estructuras vasculonerviosas.

Material y métodos: Se realizó un estudio de 21 extremidades inferiores criopreservados de cadáveres adultos y una perteneciente a un feto de 29 semanas provenientes de la sala de disección de la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud (campus de Bellvitge) de la Universitat de Barcelona. Se examinaron mediante ecografía y posterior disección anatómica y microscopía para estudiar la fascia crural y su relación con los diferentes músculos de la pierna. Se tomaron medidas antropométricas de las distancias desde la cabeza del peroné y maléolo lateral hasta el origen del músculo tibial anterior en la fascia crural, la salida del nervio peroneo superficial y la fascia que recubre los músculos posteriores profundos de la pierna.

Resultados: La fascia crural tiene relaciones clínicas muy importantes, que pueden ser identificadas por ecografía, como la misma fascia, el origen del músculo tibial anterior a 15,88 cm (IC95% 14,81 a 16,94) de la cabeza del peroné y la salida del nervio fibular superficial que cruza esta fascia a 21,33 (IC95% 20,67 a 22) cm de la cabeza del peroné. También puede observarse ecográficamente la presencia de un tabique que fija los músculos posteriores profundos de la pierna, los vasos y nervios y que podría explicar el posible desarrollo de un síndrome compartimental posterior de la pierna. El conocimiento de estas características ayudará a mantener seguras estas estructuras durante el tratamiento quirúrgico del síndrome compartimental.

Conclusiones: El estudio ecográfico permite identificar la fascia crural y su relación con estructuras musculares y nerviosas en la pierna, para evitar su lesión durante la cirugía de los síndromes compartimentales.

Your submissions

Track your submissions

COMPARTMENTS OF THE CRURAL FASCIA: CLINICALLY RELEVANT ULTRASOUND, ANATOMICAL AND HISTOLOGICAL FINDINGS

Corresponding Author: Maribel Miguel-Pérez

Surgical and Radiologic Anatomy

49683cc8-7c54-49f7-8eba-16e7122532c4 | v. 2.0

[View submission details](#)

[Editor evaluating revision](#) 12 May 23

COMPARTMENTS OF THE CRURAL FASCIA: CLINICALLY RELEVANT ULTRASOUND, ANATOMICAL AND HISTOLOGICAL FINDINGS

Ortiz-Miguel S^{1,2*}, Miguel-Pérez M, MD, PhD^{1*}, Blasi J, PhD³, Pérez-Bellmunt A, PhD², Ortiz Sagristà JC, MD, PhD⁴, Möller I, MD, PhD¹, Agullo JL, MD, PhD¹, Iglesias P¹, Martinoli C, MD, PhD⁵

1.- Unit of Human Anatomy and Embryology, 3.-Unit of Histology, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), University of Barcelona, Spain.

2.- Basic Sciences Department, Universitat Internacional de Catalunya, Spain.

4.- Anesthesia Department. Fundació Puigvert. Barcelona

5.- Cattedra di Radiologia "R"-DICMI, Università di Genova, Genoa, Italy.

* Sara Ortiz-Miguel and Maribel Miguel-Pérez contributed equally to this study.

Corresponding author: Maribel Miguel-Pérez

Unit of Human Anatomy and Embryology, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), University of Barcelona, C/Feixa Llarga s/n 08907, L'Hospitalet de Llobregat, BCN, Spain.

Tel.: 0034 93 4020170.

E-mail address: mimiguel@ub.edu

Running title: Ultrasound, anatomical and histological study of the crural fascia-

ABSTRACT

PURPOSE Compartment syndrome is a surgical emergency that can occur in any part of the body and can cause cell necrosis when maintained over time. The resulting defects can affect the nerves, muscle cells, bone tissue and other connective tissues inside the compartment and fasciotomy has to be performed. The anatomical and histological characteristics of the leg make acute, chronic and exertional compartment syndrome more likely in this limb. For these reasons, knowledge of the ultrasound, anatomical and histological features of the crural fascia can help in the treatment of leg compartment syndrome.

METHODS Twenty-one cryopreserved lower limbs from adult cadavers and from one 29-week-old fetus were obtained from the dissection room. They were examined by ultrasound and a subsequent anatomical dissection and microscopy to study the crural fascia and its relationship with the different muscles. Anthropometric measurements were taken of the distances from the head of the fibula and lateral malleolus to the origin of the tibialis anterior muscle in the crural fascia, the exit of the superficial fibular nerve, and the fascia covering the deep posterior muscles of the leg.

RESULTS The crural fascia has very important clinical relationships, which can be identified by ultrasound, as the origin of the tibialis anterior muscle at 16.25 cm from the head of the fibula and the exit of the superficial fibular nerve that crosses this fascia at 21.25 cm from the head of the fibula. Furthermore, the presence of a septum that fixes the deep posterior muscles of the leg and the vessels and nerve can be seen by ultrasound and explain the possible development of a posterior compartmental syndrome of the leg. Awareness of these features will help to keep these structures safe during the surgical treatment of compartment syndrome.

CONCLUSIONS The ultrasound study allows identification of anatomical structures in the leg and thus avoids damage to them during surgery for compartmental syndromes.

MINI ABSTRACT

Knowledge of the muscular relationships of the crural fascia can assist its identification by ultrasound and can be of help in surgery for compartment syndrome and in other clinical applications.

KEY WORDS: Fascia, ultrasound, anatomical and histological study, lower extremity, implications.

ABBREVIATIONS:

TA: Tibialis anterior muscle

EDL: extensor digitorum longus muscle

EHL: Extensor hallucis longus muscle

PL: Peroneus longus muscle

SFN: Superficial fibular nerve

IQR: interquartile range

ICC: coefficient intraclass correlation

INTRODUCTION

Compartment syndrome is considered a clinical emergency when there is a loss of perfusion in an extremity. It can appear in any part of the body containing myofascial compartments such as the upper limbs, thighs, abdomen and buttocks [1]. However, it is more common in the leg and forearm, due to the large mass in the area and the inelasticity of the fascia [2].

In the leg, acute compartment syndrome is often caused by knee fractures, dislocations, tibial fractures [3] or soft-tissue injuries [4]. If left untreated, it will result in cellular anoxia [1]. Chronic compartment syndrome can be caused by the combination of increases in muscle volume during exercise [5] and the long-term presence of fibrosis, which increase the stiffness of the deep fascia [6]. This crural fascia is composed of dense connective tissue and surrounds all the muscles of the leg [7,8]. It also forms septa to compartmentalize the different groups of muscles [7].

These different layers can be seen by ultrasound, which can aid diagnosis and the application of different treatments [9]. The deep fascia is tougher in the back and lower limb, where it forms dense connective tissue sheets with a high number of closely packed collagen fibers to adapt to the mechanical requirements of the region [10]. However, despite the advantages offered by the deep fascia, there are certain circumstances in which the thickness and stiffness of the fascia can compromise the tissue, including acute [11,12] and chronic compartment syndrome [6, 13]. In the leg the crural fascia appears as a lamina of connective tissue with a mean thickness of 0.650 mm, composed of three or, at some points, two layers of parallel collagen fiber bundles that are separated by a thin layer of loose connective tissue [14]. The connections between the muscles and muscular fasciae are constant and show precise organization [15,16]. Depending on the type of movement, specific muscles are activated, stretching selective portions of the muscular fascia through the actions of specific myofascial expansions. This organization can be observed in all the limbs, indicating that the fasciae act like a transmission belt between two adjacent joints and also between synergist muscle groups, guaranteeing perceptive and directional continuity and probably representing the anatomical basis of myokinetic chains [17].

Once compartment syndrome is diagnosed, it can be difficult to perform a fasciotomy without damaging certain anatomical structures such as the superficial fibular nerve [18, 19]. This is why some studies believe that the ultrasound approach should be used to avoid iatrogenic damage [20]. However, anatomical structures present variations and may sometimes be difficult to recognize in an ultrasound study. The aim of this study was broad-

ening our knowledge of the crural fascia and its anatomical relationships by performing an ultrasound, anatomical and histological study. This information may help in guide the surgical treatment of compartment syndrome.

MATERIAL AND METHODS

An observational ultrasound, anatomical and histological study was performed on a total of 21 lower limbs (9 left and 12 right) obtained from the cadavers of 10 women (44%) and 11 men (56%), ranging in age from 61 to 92 years (table 1), as well as on one 29-week-old fetus. The limbs had been cryopreserved at -20°C in the dissection room of the Faculty of Medicine and Health Sciences at the University of Barcelona. They were numbered in order according to their ultrasound, anatomical and histological study. Dysmorphic limbs and those that had undergone surgery or trauma in the area being studied were rejected and are not included in the 21 legs examine. The study was approved by the local ethics committee.

Prior to the study, one fresh lower limb was injected with black latex in the femoral artery and dissected in the anatomical position to observe the relationships of the crural fascia with the different muscles in the anterior, posterior, medial and lateral compartments and to visualize the different subcompartments that this fascia forms in the posterior compartment of the leg. The study began once the presence of these muscular subcompartments and anatomical structures had been confirmed.

Ultrasound study

The ultrasound study was performed with the LOGIQ P9 ultrasound system (GE Ultrasound Korea LTD, Seongnam, Korea) with a high-frequency linear probe (6-15 MHz). First, in the transverse and longitudinal axis, we visualized the muscles of the leg compartments and their relationships with the crural fascia covering them.

To identify and study the crural fascia and its relationships with the muscles, we divided the lower limbs into two groups. In the first group containing 9 lower limbs and the 29-week-old fetus, an ultrasound-guided injection with a 20G needle was performed parallel to the transducer below the fascia covering the tibialis anterior muscle (TA) and the extensor digitorum longus muscle (EDL). This injection contained 2 ml of dye (0.5 ml of a red or green dye (Tempera mate arts Titan, manufacturastitan arts SLU. Sant Fruitos del Bages. Barcelona) and 1.5 mL of saline. For the lateral compartment, we visualized the fascia that covered the peroneus longus muscle (PL) and injected below it, also with ultrasound guidance. The probe was then moved to the posterior compartment and the same system was used, injecting the dye under the soleus to look for the compartment of the poste-

rior deep muscles of the leg. In the short axis, a sweep was performed to confirm adequate diffusion of the dye inside the injected compartments.

In the second group containing 12 lower limbs, we took anthropometric measurements of the distances from the head of the fibula and lateral malleolus to the origin of the TA in the crural fascia, the exit of the superficial fibular nerve, and the fascia covering the deep posterior muscles of the leg.

Anatomical study

After the ultrasound study, we performed a gross anatomical study by dissecting 17 legs, performing 4 transverse cuts on the leg at the point of the injection.

The anatomical dissection was first performed on the lateral side of the leg, following a classical method along the planes. A longitudinal lateral incision and two horizontal incisions were performed under the patella proximally and at the ankle distally. The posterior compartment was dissected in the same way.

In the first group, after dissection in the planes of the skin and subcutaneous or adipose tissue, the crural fascia of the anterior compartment was exposed and the location of the dye was studied to determine whether there had been any extravasation. The crural fascia was then cut 3 cm laterally from the anterior border of the tibia to avoid cutting the muscle fibers of the TA in this fascia. Subsequently, we observed the position of the dye for each of the muscles studied (TA and EDL). The same was undertaken in the lateral compartment (PL). In the posterior compartment, the crural fascia was cut along the posterior median line. The gastrocnemius and soleus muscles were identified and removed. When the deep posterior muscles were exposed, we checked that the dye was contained between the fasciae covering these muscles. On 4 legs, a sectional anatomy was undertaken by performing transverse cuts at the superior and inferior third of the leg to observe whether the dye was located below the fascia. This information was used to assess the relationship of the fascia with the muscles studied.

In the second group containing 12 lower limbs, we took anthropometric measurements of the distances from the head of the fibula and lateral malleolus to the origin of the TA in the crural fascia, the exit of the superficial fibular nerve, and the fascia covering the deep posterior muscles of the leg. The ultrasound and anatomical measurements were compared.

The leg of the fetus was dissected, and the dye was observed in the different compartments. At each step, images were taken to record information (Canon EOS 60D).

Histological study

In one specimen, six different samples of a similar size (1 cm x 2 cm) were taken from different points of the crural fascia:

- in the superior third of the leg where the TA originates at the crural fascia.
- in the middle third of the anterior side of the leg.
- in the superior retinaculum above the TA and EDL.
- at the fascia covering the deep posterior muscles in the middle third of the posterior side of the leg.
- Superficial to the gastrocnemius in the superior and inferior third of the crural fascia.

The samples were fixed in 4% formaldehyde and processed into paraffin blocks. They were then cut into 4- μ m sections and dyed with the haematoxylin-eosin stain. The thicknesses of the fascia were measured and observed with a Leica Digital Microimaging Device (Leica DMD108 microscope). Fluorescent images were obtained from haematoxylin-eosin stained sections using a Carl Zeiss Axioimager M2 (excitation 385/30 and emission 425/30). Fluorescence images allowed a better analysis of fascia organization into layers.

Statistical analysis was performed on all the data obtained for the control variables (sex, limb side and age) and the anthropometric variables. The qualitative variables are present in the form of absolute and relative frequency; the quantitative variables in the form of median and interquartile range (IQR) and average with standard deviation. The agreement between the measures of the anatomical structures obtained by dissection and their estimation based on the measurement by ultrasound is studied by the coefficient intraclass correlation (ICC) and the Bland-Altman graphic.

RESULTS

Ultrasound study

In all the lower limbs, the ultrasound study allowed the identification of the crural fascia, below the adipose tissue, as a continuous well-differentiated echogenic line surrounding the muscles of the anterior, posterior and lateral compartments and isolating each of these compartments. This information allowed the injection of the dye into each of the spaces below the fascia and the different muscles.

A more detailed study of the crural fascia showed that in the anterior compartment it gives a hyperechogenic or hypoechogenic line (depending on the perpendicular situation of the probe on the leg) between the TA and EDL that separated the two muscles, (Figure 1A, 1B). Inferiorly, along the long axis, a hypoechogenic image (Figure 2A), 16.25 cm from the head of the fibula marked the end of the TA at this fascia. It also was seen along the transversal axis, between the TA and EDL that distinguished these muscles from one another (Figure 2B). Inferiorly, before the level of the ankle, the deep fascia made extensions into the bone to separate the tendon of the TA (Figure 3A), from extensor hallucis longus muscle (EHL) and EDL. It fixed at the medial malleolus and lateral malleolus medially and laterally, respectively.

In the lateral compartment, we observed the crural fascia fixed at the medial crest and lateral surface of the fibula, isolating the peroneus longus and peroneus brevis muscles. In this compartment, we found the superficial fibular nerve. This nerve can have a variable pathway before crossing the crural fascia but it finished crossing this fascia to exit from this compartment at 21.25 cm from the head of the fibula and 12.5 cm from the lateral malleolus. However, certain variations were observed. In one case the nerve crossed the septum between the lateral and anterior compartments and continued in this anterior compartment until the exit. In other of the cases, the nerve crossed the septum between the lateral and anterior compartments and returned to the lateral compartment before exiting definitively. Finally, in three of the cases studied (25%), the nerve crossed the crural fascia, but there was a tunnel formed by this fascia measuring 4.33 cm inside which the nerve was located surrounded by adipose tissue (Figure 4A, 4B).

In the posterior compartment, we identified the crural fascia as a hyperechogenic line surrounding the posterior muscles of the leg. This line was fixed, with the medial and lateral malleolus occurring inferiorly. However, another thick hyperechogenic line was observed that began in the inferior middle of the leg (15.75 cm from the head of the fibula and 18 cm from the lateral malleolus), which separated the deep posterior muscles of the posterior compartment as well as the blood vessels and nerves from the triceps surae muscle (Figure 5A, 5B) (Table 2). In addition, after the flexor digitorum longus muscle crossed the tibialis posterior muscle, different compartments were observed for the deep posterior tendons of the leg: tibialis posterior, flexor digitorum longus, flexor hallucis longus muscles and tibialis posterior vessels and tibial nerve (Figure 6A).

In the fetus, the crural fascia was similar to that of the adult. It formed three compartments, with a deep fascia isolating the deep muscles of the posterior side of the leg, thereby showing the same characteristics as those in

the adult; however, the septum between the tibialis anterior muscle and extensor digitorum longus muscle was not observed (Figure 7).

Anatomical study

The anatomical study showed that the injected dye remained below the fascia for each of the muscles studied. There was no extravasation of the dye into other muscle compartments in the adults and the fetus, thus demonstrating the independence of the anterior, lateral and posterior compartments in the leg.

Dissection revealed that the crural fascia in the anterior compartment was fixed superiorly to the tibia and the head of the fibula and inferiorly to the lateral and medial malleolus. Laterally, the fascia was fixed at the anterior border of the fibula and medially at the anterior border and medial side of the tibia. In the lateral compartment, the fascia was fixed on the fibula, surrounding and isolating the peroneal muscles. In the posterior compartment, superiorly, the fascia was continuous with the fascia lata and was fixed on the tibia and fibula medially and laterally, before reaching the inferior part where it was fixed on the medial and lateral malleolus.

In the anterior compartment, we observed that the crural fascia gave an expansion that continued inferiorly as an aponeurosis that belonged to the TA in 42.8% (5 right and women and 4 left and man) or the EDL in 57,2%. (8 right and 4 left, 7 women and 5 men) of the specimens (Figure 1C, 1D). This expansion corresponded to the hyperechogenic line seen as a septum in the ultrasound study that seemed to isolate the TA and EDL. However, in the fetus, no aponeurosis was observed macroscopically for the TA or EDL.

We observed that the TA originated at the crural fascia, 15 cm from the head of the fibula and 18,70 cm from the lateral malleolus. This was also noted in the ultrasound study. However, this origin was interrupted (Figure 8A); just inferior to this region, the ultrasound study showed a hypoechogenic area that corresponded to the adipose tissue separating the TA and EDL (Figure 2C, 2D). In the inferior part of the leg, we observed that the tendons of the TA, EDL and EHL had a deep relationship with the fascia. At this point, the crural fascia formed the superior and inferior retinaculum of the ankle and formed septa to isolate the different tendons (Figure 3B), as also revealed by the ultrasound study.

A deep dissection of the TA revealed the rich vasculature extending from the anterior tibial artery to the TA (Figure 9).

In the lateral compartment, the crural fascia was fixed on its lateral surface to the posterior surface of the fibula, isolating the peroneus longus and brevis muscles. The peroneus longus originated directly from the crural fascia before reaching the middle third of the leg. The crural fascia reached the lateral malleolus and there was no septum separating the peroneus longus and brevis muscles superior to the ankle.

We observed a relationship of the superficial fibular nerve with the lateral compartment. The nerve moved from the posterior to the anterior position, crossing the peroneus longus before exiting. It crossed the crural fascia 21.25 cm from the head of the fibula and 12.25 cm from the lateral malleolus. However, the ultrasound showed several variations in its exit.. In one case, the nerve had an anterior position in the lateral compartment throughout the pathway. In other cases, the nerve crossed the septum between the anterior and lateral compartments and returned to the lateral compartment inferiorly (Figure 10). And in three other cases, the nerve exited the lateral compartment 3-5 cm before the definitive exit from the crural fascia, but inside a tunnel that the crural fascia had made for it (Figure 4C, 4D) as ultrasound study showed.

In the posterior compartment, the crural fascia surrounded the posterior muscles of the leg. When we cut this fascia along the posterior median line, we observed that the gastrocnemius muscle had not originated from the fascia (Figure 11) and the fascia followed it laterally and medially before being inserted into the fibula and tibia. Furthermore, inferiorly, there was a fascia covering the deep posterior muscles of the leg, the tibial nerve and the posterior tibial vessels from the soleus muscle and calcaneal tendon. When the gastrocnemius and soleus muscles were removed (distal to proximal) from the inferior third of the leg, we observed that fascia was a septum to 15.50 cm from the head of the fibula and 18.7cm from the lateral malleolus. It corresponded to the hyperechogenic septum observed in the ultrasound study. This septum had connective fibers with different directions and patterns, but it enclosed the deep posterior muscles and tendons just before the medial and lateral malleolus where it was fixed (Figure 5C, 5D, 5E). Moreover, a detailed dissection showed that at this point, this fascia followed the crural fascia of the anterior compartment. Just before the medial malleolus and after the sural decussation, this fascia formed different septa for the tibialis posterior and flexor digitorum longus tendons, as well as for the nerve, blood vessels and the flexor hallucis longus tendon just after the sural decussation (the point where the flexor digitorum longus crosses superficially the tibialis anterior muscle) (Figure 6B, 6C). We also observed this septum in the fetus but extending superiorly.

Statistical study

The measurements obtained showed a very good agreement in all the comparisons conducted between the anatomical measures and their ultrasonographic estimations (Table 3, ICC >0.9). The difference between the anatomical and ultrasound measures was 0.12 cm (95%CI -0.03 to 0.37). The distribution of the differences between the both studies was displayed in a Bland-Altman plot.

Histological study

All the samples showed the organization of the connective tissue into two or three different layers depending on the regional areas. Moreover, we found some differences between them. We observed that the crural fascia, at the anterior compartment in the superior part of the leg was much thicker (0.840 mm) than in the inferior part (0.198 mm) before it reached the superior retinaculum. The morphology of the crural fascia at the posterior compartment was very similar, with a great thickness, at the superior side than at the inferior side, (0.841 mm vs 0.231 mm). The disposition of the layers was transversal and longitudinal at the superior part (Figure 12A, 12B) and longitudinal at the inferior part are (Figure 12C, 12D). In the superior retinaculum, the crural fascia showed differences just above the TA, presenting several parallel layers of dense connective tissue and a thickness of 0.567 mm. However, above the EDL, the dense connective tissue changed morphology and became thicker, increasing to 0.356 mm (Figure 3C, 3D). Also at the anterior compartment, and correspondingly, as observed in the macroscopic anatomical study, we noted a relationship between the fascia and the muscle fibers of the TA. In some places, the muscle fibers were inside the fascia, while in others, the muscle fibers showed no relationship with the fascia (Figure 8B, 8C).

Finally, the fascia covering the deep posterior muscles of the leg, had a thickness of 0.689 mm (Figure 6D).

DISCUSSION

The study of the crural fascia revealed a strong relationship between this fascia and the muscle fibers of the TA. The TA makes up the majority of the muscle volume in the leg anterior compartment (59.7%) [21]. Moreover, the origin of the TA in this fascia, with attachments interrupted, 16,25 cm from the head of the fibula, can be identified by ultrasound through the longitudinal orientation of the fascial fibers. Distally to this distance, the presence of a hypoechogenic area, between the TA and EDL can be used to avoid the cutting the fibers of the origin of the TA on the crural fascia. We propose this as a new approach, during a fasciotomy, in the surgical treatment of compartment syndrome [22] and as a way to resolve the frequent ischemia of the TA [22, 23, 24].

This procedure has not been reported before. Furthermore, it would prevent the development of chronic compartmental syndrome by reducing the amount of muscle fibers unintentionally damaged during surgery [23].

Distally, just above the ankle, the crural fascia forms the extensor retinaculum which isolates the tendons of the TA, EDL and EHL. We postulate that this superior retinaculum is important for the functions of these muscles in the foot. It forms a special canal for each tendon. Furthermore, the histological differences observed among the tendons just above the TA and EDL may explain why that the tendon of the TA, is reinforced and more firmly attached for a better pulley and dorsal flexion of the foot.

The involvement of the anterior compartment is usually accompanied by the involvement of the lateral compartment in chronic [25] and acute compartment syndrome [26]. This may lead to damage of the superficial fibular nerve. The anatomical study showed that the nerve exited 21.25 cm from the head of the fibula and 12.25 cm from the lateral malleolus. Our results are similar to those of other articles that have measured the distance between the exit of the superficial fibular nerve from the crural fascia and of the lateral malleolus apex. For example, one study reported a distance of 10.33 cm for intraseptal cases and 11.28 cm for extraseptal cases [27], while another reported $11.36 \text{ cm} \pm 4.39 \text{ cm}$ [28]. However, as in those studies, we observed great variability in the number of nerve divisions [29] and their trajectory [28]. The frequency of these variations is similar to that reported by other authors of 23% [30] although some studies have found only 8,3% [31]. For this reason, in agreement with other authors [20, 28], we believe that the use of ultrasound should be mandatory when performing a fasciotomy to avoid any iatrogenic damage to the superficial fibular nerve.

Regarding the posterior compartment, also in agreement with previous studies, we observed that the crural fascia surrounds the posterior muscles, but neither of the heads of the gastrocnemius is attached to the fascia [32]. These anatomical characteristics are of special importance for the muscles that form the superficial compartment, allowing them to move independently of their fascia during powerful contractions in weight-bearing activities [7]. In this compartment, the ultrasonographic study identified the fascia that covers, the deep posterior muscles as a hyperechogenic [33] and proved in the anatomical dissection. It forms a broad fascial compartment that enclosed and attached the flexor digitorum longus, the tibialis posterior, the flexor hallucis longus, muscles, the tibial nerve and the posterior tibial vessels. and separated them from the soleus muscle. It is reinforced by some transversal bands which may explain why it is necessary to reopen and remove strips of this fascial tissue in the surgical treatment of recurrent chronic exertional compartment syndrome [34,35]. Thus, this information

may lead to a re-exploration of the three deep muscles, avoid complications [36, 37, 38] and be helpful in establishing a standard number of required incisions [39]. However, surgery in this compartment has low success rate [34, 36, 39] because there is a small space between the fascia and the muscles, increasing the possibility of damaging the muscles as well as the blood vessels and nerve that are associated with these muscles [36, 37, 38]. Nevertheless, the ability to identify the fascia by ultrasound, as we were able to do, could improve the gold standard approach of opening the fascia and accessing the superficial and deep compartments. More studies are now required to improve the efficiency of the technique [34, 38]. The histological study shows that this septum was composed of dense connective tissue arranged into several layers. However, we cannot compare these findings with those of other studies. This fascia was thicker in the inferior area of the leg before becoming fixed on the medial and lateral malleolus.

Regarding the histological study, our findings of the morphometric evaluation of the fascia were similar to those of other studies, which have reported a mean thickness of 1 mm. [15]. However, we observed some differences in the thickness of the fascia at different points in the leg. For example, in the superior part of the anterior and posterior compartment, the fascia was thicker than in the inferior part of the anterior and posterior compartment. Moreover, this difference in thickness was larger in the posterior part of the leg, possibly due to the larger numbers of muscle fibers of the TA and EDL. In the dorsal superior retinaculum, the thickness was greater over the TA than the EDL, even with the different morphology of the superior retinaculum. This might be because the tendon of the TA has to be better fixed to allow the foot to perform its movements. Curiously, the fascia covering the deep posterior muscles of the leg, presented the highest values for thickness of all those obtained in this study.

In the fetus, we confirmed the presence of a deep fascia surrounding the leg. It has been previously reported that the fascia is present from week 21 of human development [40]. Moreover, we found that the fascia forms three different compartments in the leg at 29 weeks of human development, as in the adult. It is perfectly differentiated for muscle movement in the womb, possibly facilitating the configuration of the leg fasciae. However, we did not observe the presence of an aponeurosis separating the TA and EDL. Furthermore, the posterior fascia of the deep posterior muscles was thicker in the fetus than in the adult and tended to decrease in thickness, as demonstrated in a previous study [41].

Conclusions:

This study broadens our knowledge of the ultrasound, anatomical and histological characteristics of the crural fascia. This information may help prevent damage to structures (such as the superficial fibular nerve, the vascular area of the deep posterior compartment muscles and the TA muscle fibers during the surgical treatment of acute and chronic compartment syndrome. Our findings allow a better identification of these structures, facilitating the diagnosis of any pathology in the area, and has several potential clinical and therapeutic applications.

ACKNOWLEDGMENTS

Thank you so much to all the body donors.

DECLARATIONS

Ethical Approval

The study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and approved by the Ethics Committee from Universitat de Barcelona: Institutional Review Board (IRB00003099).

Consent for publication

All the donators gave their consented in life to participate and to publish in life and consequently to made investigation and also university teaching

Competing interests

The authors declare no conflict of interest.

Authors' contributions

SO-M: manuscript writing, project development. MM-P: Investigation, project development and editing. JB: investigation. AP: conceptualization, technical support. JO-S: statistical analysis, technical support, software. IM: Project development, data collection, manuscript writing. JA: conceptualization, technical support. PI: Investigation, technical support technical support. CM: manuscript writing

Funding

The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose. This work was not funded.

Availability of data and materials

We declare that there is no problem to access to the datasets used can be accessed.

REFERENCES

- [1] Tristan E, Gardner WT, Schmidt AH, Johnstone J (2019) Diagnosing acute compartment syndrome-where we got to?. *Int Orthop*, 43: 2429-2435
- [2] Olson SA, Glasgow RR. (2005) Acute compartment syndrome in lower extremity musculoskeletal trauma. *J Am Acad Orthop Surg* 13:436-444
- [3] Blick SS, Brumback RJ, Poka A, Burgess AR, Ebraheim NA. (1986) Compartment syndrome in open tibial fractures. *J Bone Joint Surg Am* 68:1348-1353
- [4] McQueen MM, Gaston P, Court-Brown CM. (2000) Acute compartment syndrome. Who is at risk? *J Bone Joint Surg Br* 82-B:200–203
- [5] Puranen J. (1974) The medial tibial syndrome: exercise ischemia in the medial fascial compartment of the leg. *J Bone Joint Surg Br* 56-B (4): 712-715
- [6] Gabbiani G. (2003) The myofibroblast in wound healing and fibrocontractive diseases. *J Pathol* 200; 500-503
- [7] Benjamin M (2009) The fascia of the limbs and back—a review. *J Anat* 214 (1): 1-18
- [8] Pirri C, Fede C, Petrelli L, Guidolin D, Fan C, De Caro R, et al (2022) Elastic fibres in the subcutaneous tissue: Is there a difference between superficial and muscular fascia? A cadaver study. *Skin Res Technol* 28 (1):21-27
- [9] Ortiz-Miguel S, Miguel-Pérez M, Navarro J, Möller I, Pérez-Bellmunt A, Agullo JL et al (2021) Compartments of the antebrachial fascia of the forearm: clinically relevant ultrasound, anatomical and histological findings. *Surg Radiol Anat.* 43(10):1569-1579
- [10] Schleip R, Klingler W, Lehmann-Horn F (2005) Active fascial contractility: Fascia may be able to contract in a smooth muscle-like manner and thereby influence musculoskeletal dynamics. *Med Hypotheses* 65(2):273-277
- [11] Pechar J, Lyons MM. (2016) Acute compartment syndrome of the lower leg: a review. *J Nurse Pract* 12: 265-270.
- [12] Von Schroeder HP, Botte MJ (1998) Definitions and terminology of compartment syndrome and Volkmann's ischemic contracture of the upper extremity. *Hand Clin* 14(3): 331-334
- [13] Bouche RT, Johnson CH. (2007) Medial tibial stress syndrome (tibial fasciitis) a proposed path-mechanical model involving fascial traction. *J Am Podiatr Med Assoc* 97: 31-36

- [14] Benetazzo L, Bizzego A, De Caro R, Frigo G, Guidolin D, Stecco C (2011) 3D reconstruction of the crural and thoracolumbar fasciae. *Surg Radiol Anat* 33(10): 855-862. doi: 10.1007/s00276-010-0757-7
- [15] Stecco C, Porzionato A, Lancerotto L, Stecco A, Macchi V, Day JA et al (2008) Histological study of the deep fasciae of the limbs. *Body Mov Ther* 12(3):225-230. doi: 10.1016/j.jbmt.2008.04.041
- [16] Stecco A, Masiero S, Macchi V, Stecco C, Porzionato A, De Caro R (2009) The pectoral fascia: anatomical and histological study. *J Bodyw Mov Ther.* 2009 Jul;13(3):255-261. doi: 10.1016/j.jbmt.2008.04.036
- [17] Stecco L. (2004). *Fascial Manipulation for Musculoskeletal pain*. Ed. Piccin. Padova
- [18] Mauser N, Gissel H, Henderson C, Hao J, Hak D, Mauffrey C (2013) Acute lower-leg compartment syndrome. *Orthopedics* 36 (8):619-624
- [19] Ritenour AE, Dorlac WC, Fang R, Woods T, Jenkins DH, Flaherty SF et al (2008) Complications after fasciotomy revision and delayed compartment release in combat patients. *J. Trauma* 64: S153-62
- [20] Balus R, Bong DA, Ardèvol J, Pedret C, Codina D, Dalmau A (2016) Ultrasound-Guided fasciotomy for Anterior Chronic Exertional Compartment syndrome of the leg. *J Ultrasound Med* 35 (4): 823-829
- [21] Nakagawa Y, Ratkevicius A, Mizuno M, Quistorff B (2005) ATP economy of force maintenance in human tibialis anterior muscle. *Med Sci Sports Exerc* 37(6):937-943
- [22] Shuler FD, Dietz MJ (2010) Physicians' ability to manually detect isolated elevations in leg intracompartmental pressure. *J Bone Joint Surg Am* 92(2):361-7
- [23] de Bruijn J, Winkes M, van Eerten P, Scheltinga M (2020) Chronic exertional compartment syndrome as a cause of anterolateral leg pain. *Unfallchirurg* 123(Suppl 1):8-14
- [24] Grant JCB (1948) *A Method of Anatomy*. London: Baillière, Tindall and Cox
- [25] Braver RT (2016) Chronic Exertional Compartment Syndrome. *Clin Podiatr Med Surg* 33(2):219-33
- [26] von Keudell AG, Weaver MJ, Appleton PT, Bae DS, Dyer GSM, Heng M et al (2015) Diagnosis and treatment of acute extremity compartment syndrome. *Lancet* 386(10000):1299-1310
- [27] Valisena S, Gamulin A, Hannouche D (2021) The Intraspetal Course of the Superficial Peroneal Nerve: An Anatomic Study. *Foot Ankle Int* 42 (9): 1171-1178
- [28] Relvas-Silva M, Pinho AR, Lopes JG, Lixa J, Leite MJ, Sousa AN et al (2021) Anatomy of the superficial peroneal nerve: Can we predict nerve location and minimize iatrogenic lesion? *Morphologia* 105 (350): 204-209
- [29] Williams EH, Dellon AL (2007) Intraseptal superficial peroneal nerve. *Microsurgery* 27(5): 447-480
- [30] Ducic I, Dellon AL, Gras KS (2006) The clinical importance of variations in the surgical anatomy of the superficial peroneal nerve in the mid-third of the lateral leg. *Ann Plast Surg* 56 (6): 635-638

- [31] Adkison DP, Bosse MJ, Gaccione DR, Gabriel KR (1991) Anatomical variations in the course of the superficial peroneal nerve. *J Bone Surg Am* 73 (1): 112-114
- [32] Niechajev I (2005) Calf augmentation and restoration. *Plast Reconstr Surg* 116(1):295-305; discussion 306-307
- [33] Reisner JH, Noble-Taylor KE, Cummings NM, Lachman N, Finnoff JT (2021) Ultrasound-Guided Fasciotomies of the Deep and Superficial Posterior Leg Compartments for Chronic Exertional Compartment Syndrome: A Cadaveric Investigation. *PM R* 13(8):862-869
- [34] Turnipseed WD (2002) Diagnosis and management of chronic compartment syndrome. *Surgery* 132(4):613-7
- [35] Detmer DE (1986) Chronic shin splints. Classification and management of medial tibia stress syndrome. *Sports Med* 3:436-46
- [36] Winkes MB, Tseng CM, Pastans HL, van der Crujisen-Raaijmakers M, Hoogeveen AR, Scheltinga MR (2016) Accuracy of Palpation-Guided Catheter Placement for Muscle Pressure Measurements in Suspected Deep Posterior Chronic Exertional Compartment Syndrome of the Lower Leg: A Magnetic Resonance Imaging Study. *Am J Sports Med* 44 (10): 2659-2666
- [37] Winkes MB, van Zandvoort AP, de Bruijn JA, Smeets SJ, van der Crujisen-Raaijmakers M, Hoogeveen AR et al (2016) Fasciotomy for Deep Posterior Compartment Syndrome in the Lower Leg: A Prospective Study. *Am J Sports Med* 44 (5): 1309-1316
- [38] Winkes MB, Hoogeveen AR, Scheltinga MR (2014) Is surgery effective for deep posterior compartment syndrome of the leg? A systematic review. *Br J Sports Med* 48(22):1592-1598
- [39] Howard JL, Mohtadi NG, Wiley JP (2000) Evaluation of outcomes in patients following surgical treatment of chronic exertional compartment syndrome in the leg. *Clin J Sport Med* 10:176-184
- [40] Blasi M, Blasi J, Domingo T., Pérez-Bellmunt A., Miguel-Pérez M (2015) Anatomical and histological study of human deep fasciae development. *Surg Radiol Anat* 37(6): 571-578. doi: 10.1007/s00276-014-1396-1
- [41] Pirri C, Petrelli L, Pérez-Bellmunt A, Ortiz-Miguel S, Fede C, De Caro R et al (2022) Fetal Fascial Reinforcement Development: From "a White Tablet" to a Sculpted Precise Organization by Movement. *Biology (Basel)* 11;11(5):735

DISCUSIÓN

DISCUSIÓN

Al inicio, cuando la recuperación del saber de la fascia era primicia, la definición de la fascia era un tanto divergente. Para muchos expertos en el campo, solo los tejidos conectivos densos en forma de lámina se podían considerar 'fascia', y solo si expresaban más de una dirección de fibra dominante. Esta definición reducía el concepto de fascia, no considerando fascia a todo aquel tejido que no cumpliera con estos parámetros (64). Contrario a este concepto, otros autores en este campo abogaron por incluir también, las zonas areolares dentro de la hipodermis o las envolturas alrededor de los vasos (188). Otros autores describían además cómo fascia la envoltura de las vísceras, dando gran importancia al mediastino, pericardio y raíz del mesenterio (189,190), en oposición a otros que restringían el término 'fascia' en relación con los tejidos musculares. En la actualidad prácticamente la totalidad de los anatomistas están de acuerdo en considerar que los tabiques musculares y el perimysio son tejidos fasciales, aunque hay menos consenso sobre el endomysio. El problema es que la falta de consenso conlleva a una gran dificultad en la comunicación entre los diferentes profesionales en el campo (191) y a no poder aplicar términos específicos a estructuras anatómicas muy concretas.

Existen diferentes intentos de hacer converger la opinión de los especialistas. Primero, el Comité Internacional de Nomenclatura Anatómica confirmó el uso de 'fascia superficial' para toda la lámina de tejido subcutáneo laxo y al tejido conectivo denso irregular la denominó 'fascia profunda' (192). Aunque estas medidas no fueron seguidas por todos los autores. Con la intención de solucionar este conflicto el Comité Federal de Terminología Anatómica intentó conducir hacia un lenguaje internacional más uniforme. De esta manera, se definió la fascia como vainas, láminas y otras agregaciones de tejido conectivo disecable. Por lo tanto, se incluía dentro de este concepto las agregaciones de tejido conectivo denso y

se volvía a excluir otras como el tejido conectivo laxo (64). Y ello también ocasionó la crítica de varios autores. Por dos motivos, uno es que designar con una sola palabra el término de fascia es muy amplio y no permite distinguir los distintos tipos de fascia (62,63). El otro, es que la fascia varia, histológica y morfológicamente, dependiendo de dónde se encuentre el tejido (2,65), la vecindad de las articulaciones principales (2,32) y las fuerzas en las que se encuentre (2,76). Por otro lado, si no se considera el tejido conectivo laxo cómo tejido conectivo es un tanto incoherente, ya que está presente en la fascia profunda y es muy importante para el sistema musculoesquelético porque le otorga gran parte de sus propiedades y coopera ampliamente con sus funciones (2,32).

Los puntos similares de crítica de los especialistas que investigan este tejido fascial, se fusionaron para unir fuerzas y establecer un consenso (2,62–64). Como resultado, la Fascia Research Society, una sociedad que promueve el entendimiento de las propiedades y funciones de la fascia, encargó a un grupo de expertos la creación de un comité de nomenclatura fascial (Fascia Nomenclature Committee) (64). Este comité define la fascia cómo un continuo tri-dimensional de tejido conectivo blando, laxo y denso fibroso que impregna el cuerpo. La definición incorporó al tejido adiposo, adventicio, vainas neurovasculares, aponeurosis, fascia profunda y superficial, epineuro, cápsulas articulares, ligamentos, membranas, meninges, expansiones miofasciales, periosteo, retináculos, septums, tendones, fascial visceral y todos los tipos de tejido conectivo incluyendo endomiseo, perimiseo y epimiseo, tal como se describió en la introducción, y con la que estamos de acuerdo. Y así resumimos, que el sistema fascial rodea, entreteje y interpenetra todos los órganos, músculos, huesos, fibras nerviosas, dotando el cuerpo de una estructura funcional y proveyendo de un medioambiente que permite a los sistemas del cuerpo trabajar de una manera integrada (61).

En relación con lo expuesto, nuestros estudios adoptan el término de fascia profunda indiferentemente como fascia muscular de una zona topográfica o como los anatomistas la describen con el nombre propio de fascia antebraquial en el antebrazo y fascia crural en la pierna.

Esta estructura que rodea todos los músculos en las extremidades del cuerpo humano tiene la facultad de ser visualizada como una estructura hiperecogénica ecografía al estar formada por tejido conectivo denso (104) y de acuerdo con otros autores que demuestran que el ultrasonido de alta definición con una frecuencia de 6 a 15MHz permite su identificación y la de las estructuras adyacentes (75,127,200,201). Esta técnica ofrece información relevante sobre los cambios de la fascia y de las diferentes estructuras dentro del compartimiento (193–195) y puede ser utilizada de forma dinámica. Esta visualización de la fascia también facilita el estudio de su relación con otras estructuras como los músculos y estructuras vasculonerviosas, y ello ha favorecido dos de los estudios presentados. En uno de ellos se observan las expansiones fasciales que realiza la fascia profunda en los compartimientos anterior y posterior del antebrazo y que tabican los músculos más superficiales (104). En el estudio realizado en la pierna se observa la estrecha relación del tibial anterior con la fascia profunda y que además lo hace de forma ininterrumpida y en el tercero la relación del nervio cubital con la fascia profunda en diferentes puntos además de valorar las variaciones anatómicas por su importancia clínica (180).

El estudio ecográfico del cuerpo humano permite describir una anatomía humana desde otra visión diferente a la descrita en los tratados clásicos, y centrándonos en la visión de la fascia, a darse cuenta de la estrecha relación que mantiene dicha fascia en el origen y trayecto de los músculos, ello también ayude a entender la función de éstos y algunas patologías del sistema musculoesquelético. Lo que es evidente es que la ecografía aumenta

la visión de la anatomía macroscópica y se acerca a una visión más detallada de la misma. Con el fin de profundizar en lo anterior, se inició el estudio de la fascia profunda y en relación con el síndrome compartimental en el antebrazo y en la pierna. Sin embargo, existe poca bibliografía sobre las características anatómicas y mecánicas de esta fascia y en relación con las fascias subyacentes (50,69). Algunos autores describen que cuando hay disfunciones en esta fascia se produce una fibrosis de la misma con aumento del grosor en los retinacula cutis y en algunos casos estos cambios acaban alcanzando a la fascia profunda (60) .

El conocimiento previo de la fascia profunda microscópicamente también es un aspecto importante y que podría ser utilizado para comprender la relación de ésta en un síndrome compartimental crónico, normalmente explicado por un aumento del tamaño muscular y la presión sobre los vasos sanguíneos y estructuras nerviosas (136,144) cuando se realiza ejercicio físico sumado a la inelasticidad de la fascia (134,137). Sin embargo, los cambios microscópicos de la fascia en un síndrome compartimental podrían ser más consecuencia del síndrome que la causa. Además, no todos los atletas que efectúan de manera repetitiva un mismo movimiento realizan un síndrome compartimental crónico. Y también, cómo se ha descrito anteriormente, la fascia también puede estar sujeta a cambios patológicos que aumenten su rigidez.

A nivel intramuscular sería interesante mirar los cambios en el epimisio, ya que este es especialmente sensible a las alteraciones en el ácido hialurónico y colágeno (60), pudiendo provocar gran parte de los síntomas dolorosos (94). Se desconoce si en el síndrome compartimental crónico se produce una disfunción del ácido hialurónico, alterando el deslizamiento de la fascia profunda sobre el músculo (67). O si una posible fibrosis por un aumento anormal del colágeno aumentaría la rigidez de la fascia (75) ocasionando un

incremento de la contracción muscular por la relación del epimisio con el huso muscular que puede hacer incrementar su contracción (59). Por el momento tan solo existe un estudio que haya medido esta fascia y solo ha podido recoger las medidas del epimisio en el tibial anterior (196).

En el estudio realizado en el antebrazo vimos cómo la fascia se ancla tanto en el epicóndilo medial como en el lateral (104). Desde el punto de vista anatómico esta inserción a nivel óseo causa que tanto en el epicóndilo lateral como en el medial se carece de espacio suficiente para unir los numerosos músculos que se originan a este nivel. Pero el origen de estos músculos sobre la fascia permite concentrar los distintos orígenes en un mismo espacio (197,198). Estos hallazgos son similares a los encontrados en nuestro estudio, en los que observamos que la fascia profunda del antebrazo no solo daba origen al PR, FRC, PL, FCC si no que gracias al estudio ecográfico se vio como la misma, formaba septums para separar los distintos orígenes; y de igual forma se observó en el compartimiento posterior del antebrazo como la fascia profunda permitía el origen del ED, E5D y ECC formando septums entre estos músculos para separarlos también (104) sin que podamos compararlo con ninguna otra referencia. El origen de estos músculos en la fascia es extenso. La extensión de estos músculos en la aponeurosis intermuscular es extensa 112.2 ± 24.7 mm para el ECU, 121.1 mm para el EDM, 101.7 ± 15.6 mm para el FRC, 108.7 ± 57 mm para el FCC (104). Esta longitud de mayor rigidez por su origen fascial creemos que es necesaria para una buena mecánica en la articulación del codo porque el refuerzo fascial del epicóndilo medial y lateral, incrementaría la sujeción de los músculos para poder estabilizar correctamente esta articulación (199). Ya que la laxitud en los tejidos musculares y fasciales de esta región está relacionada con la inestabilidad de la articulación (200,201). Por otra parte, la aponeurosis sirve de eje para poder aumentar la fuerza, ya que estos músculos se encargan de realizar princi-

palmente todos los movimientos de la articulación de la muñeca (199). A este nivel, también se ha descrito cómo la fascia recibe dos expansiones, una la del lacertus fibrosus o aponeurosis bicipital, en la cara anterior del antebrazo, y otra de las fibras musculares del extensor radial corto del carpo en la cara posterior del antebrazo. La expansión del lacertus fibrosus cubrirá los músculos del epicóndilo medial (202,203), y la continuidad de esta aponeurosis con la fascia antebraquial hace que algunos autores defiendan la idea que esta aponeurosis muscular no solo recubre los músculos, sino que crea una capa alrededor de ellos y los engloba en un compartimiento en conjunto con la arteria braquial y el nervio mediano (202). Mientras que otros autores defienden la idea que la expansión del lacertus fibrosus tan solo cubre al pronador redondo (203). En contra de la afirmación anterior, se ha de destacar que el epicóndilo medial es superior a la expansión del lacertus fibrosus, y por lo tanto la musculatura ya se ha originado en la fascia antebraquial, y es esa misma fascia la que formará los distintos septum para el origen de los distintos músculos (104). En el compartimiento lateral, no está descrito ningún compartimiento añadido que sirva de origen para los músculos que lo forman (204,205). Aunque algunos autores describen como algunas fibras musculares del extensor radial corto del carpo en la cara posterior del antebrazo alcanzan a los músculos del compartimiento posterior del antebrazo (ECD y ESD) (204). En cambio, otros autores defienden que tan solo alcanzaría a las fibras de los tendones del 2º y una porción del 3º dedo del ELD (205). En nuestro estudio comprobamos mediante la disección la hermeticidad de los distintos compartimientos. Estos resultados podrían explicarse por el origen de este músculo en el compartimiento lateral y en el septum muscular que lo divide del compartimiento posterior. A nivel mecánico las aponeurosis y expansiones que reciben los tendones a este nivel podrían modificar su mecánica y explicar parte de su patomecánica. Algunos autores explican que la expansión del lacertus fibrosus, produce una contracción concéntri-

ca en el supinador y excéntrica en el pronador redondo (203). Aún se desconoce cómo se transmite la fuerza en los sistemas biomecánicos. Pero la expansión del lacertus fibrosus y del ERCC podrían explicar porque los músculos epicondilos laterales tienen mayor tendencia a la fibrosis y cambios degenerativos en los tendones y aponeurosis (206,207) en movimientos excéntricos repentinos mientras se estabiliza la articulación del codo (208). Mientras que en el compartimiento lateral la patología sería debida a al esfuerzo repetitivo concéntrico en estos tendones que se inicia y se extiende a los músculos posteriores del carpo (209).

En relación con su inserción en los epicóndilos y su relación muscular se tiene que diferenciar distintas patologías. Así, a diferencia de las epicondilitis, que son síndromes locales del codo, el síndrome compartimental crónico posterior en el antebrazo aparece cuando la musculatura superficial de estos compartimentos no sólo tienen que garantizar la estabilidad y el movimiento de la articulación del codo sino que también tiene que transmitir y mantener la fuerza en la muñeca durante un tiempo prolongado, de manera repetitiva e intermitente y en algunos casos además están sujetos a otras fuerzas externas cómo presiones, frenados o tirones puede desembocar en un síndrome compartimental sobre la musculatura del antebrazo (151).

En el síndrome compartimental de la extremidad superior existen estudios que confirman su localización más frecuente tanto en la cara anterior o volar del antebrazo que en la dorsal o posterior (152,210,211). Esto puede ser debido a varios aspectos, uno de ellos es que los principales paquetes vasculo-nerviosos en el antebrazo se encuentra en la cara anterior, otro que la fascia antebraquial en esta cara anterior se separa en varios niveles: uno superficial donde se encuentran el: PR, FRC, PL, FCU separados y aislados entre sí pero conectados, y otro nivel más profundo, que engloba al FSD asociado a los paquetes vasculo-nerviosos

radial y cubital, al nervio mediano y al resto de la musculatura profunda (104,151,212). Aunque hay otros autores que incluso describen un tercer compartimento entre el FDS y FDP, FLP y PC (212). Es por ello importante conocer los distintos niveles del antebrazo porque varios autores afirman que una simple incisión en el compartimento volar debería ser suficiente para liberar todo el compartimento (151,152,211), mientras que hay otros que opinan que se deberían realizar varias incisiones (212). Nuestro estudio sugiere que se requieren múltiples fasciotomías (104). Una en el borde medial del FRC, otra en el borde lateral del FCC entre el FCC y FSD. Y en caso de que no sea suficiente para recuperar la presión intramuscular habitual la tercera entre el FSD con el nervio mediano y el resto de los músculos del compartimento profundo de la cara anterior del antebrazo. De esta manera, todas las estructuras neurovasculares de la superficie volar del antebrazo pueden liberarse de manera más efectiva (104,212,213).

En el compartimento posterior del antebrazo, y en caso de necesidad terapéutica, distintos estudios proponen un abordaje en la línea media y posterior del antebrazo, entre el ECD y el ERCC como un método simple y seguro (213), pero este estudio muestra como el ECC se encuentra aislado de los otros músculos, por lo tanto éste podría no ser suficiente.

En relación con la visualización de la fascia antebraquial, diversos estudios han confirmado la existencia de un nivel inferior de tejido subcutáneo o adiposo, que describe una línea ecogénica de un tejido distinto (32,214–216), que es de mayor grosor en el aspecto dorsal del antebrazo, esto debe estar en relación con la mayor demanda de movimiento en el lado flexor. Aunque no hemos encontrado ningún estudio que haga referencia a los septums intermusculares o extensiones perpendiculares que provienen de la fascia antebraquial y que son visibles en el ultrasonido y que rodean extensamente y aíslan los músculos ECC, ESD, FRC y PL (104).

Anatómicamente, la existencia de estos septums que provienen de la fascia antebraquial han sido descritos con diferente terminología (217–220), coincidiendo con las extensiones perpendiculares, descritas en nuestro estudio. Aunque es difícil adoptar un término específico para esta estructura si no hay un criterio apropiado, este estudio utiliza el término aponeurosis intermuscular porque da lugar a las fibras musculares (7,221), aunque en realidad sea una extensión de la fascia antebraquial que se envuelve alrededor de ellas. A pesar de que otros estudios estudiaron previamente la aponeurosis para el FCC y el paquete vasculo-nervioso (221) y la importancia del origen del FRC en la aponeurosis intermuscular (212), este estudio describe estas aponeurosis, mediante el ultrasonido y la disección anatómica, en más de un músculo. Además, este estudio mide la longitud del origen de estos músculos en la aponeurosis intermuscular, la parte libre siendo más larga que la muscular (104), aunque estos resultados no pueden ser comparados con ningún otro estudio. Una explicación de este origen común dividido en septums, puede ser que les ayude a realizar movimientos comunes con mayor potencia, mientras que la porción libre y aislada por la fascia antebraquial, permite el movimiento específico de cada uno de los músculos como sería necesario a nivel de la muñeca. Pero este aislamiento puede ser desventajoso en caso de un síndrome compartimental y el aumento de la presión intramuscular podría afectar a los paquetes vasculonerviosos situados inferiormente al FRC y FCC. Esto también sugiere que las fasciotomías deberían ser realizadas en diferentes puntos, en caso de que sea necesario.

También estamos de acuerdo con otros autores que sugieren que el músculo FCC es independiente del paquete vasculo-nervioso cubital y que la fascia que rodea al FCC también lo hace posteriormente haciéndolo independiente (221). Lo mismo se observó con el paquete neurovascular radial y el FRC a nivel distal de la muñeca (112). De manera que es importante evaluar la relación entre estos músculos y su paquete vasculo-nervioso de manera eco-

gráfica (104,193,195): desde que los cubren actúan como protectores anatómicos de los vasos sanguíneos y nervios, circunstancia que facilita su localización mediante ultrasonido, pero también pueden comprimirlos. Es por esto que en los síndromes compartimentales estas relaciones anatómicas pueden contribuir a la compresión de su paquete vasculo-nervioso.

Finalmente, varios autores han estudiado las asociaciones entre la ausencia de PL y su posible etiología por una variación en la vasculatura y vaina perineural (222) que puede causar tanto cambios isquémicos como morfológicos en el nervio mediano conllevando mayor rigidez y manifestando signos similares al del túnel carpiano (223,224). Los resultados del presente estudio pueden estar de acuerdo con los autores que defienden que el diámetro del nervio mediano es más pequeño en las extremidades que no tienen PL, aunque los datos obtenidos no muestran correlación estadísticamente significativa, pero dan soporte a una posible manifestación anatómica del nervio dañado con una reducción de su diámetro.

Otro aspecto a tener en cuenta en el síndrome compartimental es la presencia de terminaciones nerviosas en la fascia antebraquial. Esto significa que puede tener un grado de sensibilidad y movilidad, logrando la contracción espontánea durante el estiramiento o un pequeño trauma (210). Esto podría predisponer también al síndrome compartimental. Este estudio no muestra la existencia de estas terminaciones nerviosas, pero sí que consideramos que este hecho debería ser sujeto de estudios futuros y considerarse en la evaluación de la etiopatología y tratamiento de estos síndromes.

En nuestro estudio, la histología confirma la existencia de 2 a 3 niveles de tejido conectivo denso (104,117) en la fascia antebraquial, muy similar entre ellos y menor a 1 mm. Las medidas de este estudio son similares a los grosores observados en otros estudios realizados sobre la fascia antebraquial (105). Este tejido es fácilmente visible en ultrasonido e identi-

cable como una estructura ecoica. La medida del grosor mediante la ecografía y la histología son similares y su mínima diferencia validaría el uso de la ecografía para evaluar el grosor de la fascia. Esto puede ayudar en las fasciotomías para permitir visualizar la fascia antebraquial y controlar el nivel y profundidad del corte.

Otros estudios han abordado también la fascia crural o fascia profunda de la pierna como nuestro estudio y han observado su estrecha relación con los músculos de la pierna en los distintos compartimentos de la misma (196).

Las investigaciones sobre su relación y los síndromes compartimentales han abordado el papel de las entesis fasciales en las lesiones por sobreuso como posible etiología. En el caso del tibial anterior está descrita una amplia relación con la fascia crural por la rigidez y número de fibras que origina en ella (100,225), tal y como en nuestro estudio también se pudo comprobar. Este músculo tiene una mayor extensión de origen en la fascia crural que los otros músculos del compartimiento anterior y esto podría explicar porque se encuentra más afectado durante el síndrome compartimental agudo en la pierna (226) o porque su afectación aislada, sumada a su gran volumen dentro del compartimiento anterior (59,7%) (225), puede producir el síndrome compartimental crónico en la pierna (144). En el compartimiento lateral de la pierna observamos que el peroneo largo presentaba una gran extensión de origen en la fascia crural y ello podría explicar porque cuando se produce un síndrome compartimental crónico en el compartimiento anterior se traslada fácilmente al compartimiento lateral (146,227).

Nuestro estudio también ha aportado la longitud del origen del tibial anterior en la fascia crural que además se produce de forma ininterrumpida, tal como también confirmó el estudio histológico, a 15,88 cm (IC95% 14.81 a 16.94) desde la cabeza del peroné y fácilmente identificable por la orientación longitudinal de las fibras fasciales. Distalmente a esta distan-

cia, la presencia de un área hipoecogénica entre el músculo tibial anterior y el ELD puede ser utilizada como un nuevo punto de abordaje en una fasciotomía y una nueva forma de resolver la frecuente isquemia del TA, para evitar cortar las fibras de origen del tibial anterior en la fascia crural. Ya que, aunque se desconoce cómo puede afectar incisión de las fibras musculares en la fuerza de transmisión en los músculos vecinos (2), creemos que cuanto menor sea la lesión de las fibras musculares en su inserción fascial menos se altera la fuerza muscular del músculo y por tanto su función quedará más preservada.

Distalmente, justo por encima del tobillo, la fascia crural forma el retináculo extensor que aísla los tendones del TA, ELD y ELDG (170). El estudio realizado sobre la extremidad inferior confirma que este retináculo superior es fundamental para las funciones del pie, y forma un canal especial para cada uno de estos tendones. Además, se observaron diferencias histológicas del retináculo con relación a la porción que cubría el tendón del TA (más grueso) y el ELD, que pueden explicar porque el TA se encuentra reforzado de manera más firme para ofrecer una mejor polea para realizar la flexión dorsal del pie.

Un caso similar sucedería en la musculatura profunda del compartimento posterior de la pierna con el flexor largo de los dedos. Son varios los autores que destacan un mayor origen del músculo sobre el peroné y el TP además del descrito sobre la tibia y en un tanto por ciento pequeño de los casos este origen sería suficiente como para formar un compartimiento (107,109). Mientras que otros autores definen esta lámina como una vaina osteofascial (108,228). En nuestro estudio no encontramos dicho compartimiento. Así mismo también encontramos la estrecha relación de origen de los músculos profundos del compartimento posterior de la pierna (FLD, TP y FLDG) en el septum fascial (109), nuestro estudio comprobó la posibilidad de visualizarlo ecográficamente como una línea hiperecogénica. Esto podría explicar en parte las bandas fibrosas encontradas en el momento del abordaje

quirúrgico. En cambio, los músculos superficiales gastrocnemio y el sóleo tienen muy poco anclaje en la fascia profunda o en el septum que los divide de los músculos profundos (229), lo que les permite un mayor grado de movimiento, más apropiado por su importante función dentro de la deambulación (2). Este septum forma un amplio compartimiento que encierra y permite el origen del FLD, TP, FLP, el nervio tibial y la arteria tibial posterior con sus venas y separados del músculo sóleo. Esto está reforzado por algunas bandas transversales que podrían explicar porque es necesario reabrir y eliminar las bandas de este tejido fascial durante el tratamiento quirúrgico del síndrome compartimental (230,231). De este modo, esta información puede llevar a una reexploración de estos tres músculos profundos y evitar complicaciones (232–234) y ser útil en establecer un número estándar de incisiones requeridas (235). A pesar de ello hay que poner en evidencia que la cirugía en este compartimiento puede tener un bajo índice de éxito (230,232,235) por el poco espacio entre los músculos, la elevada posibilidad de perjudicar a los músculos al igual que a los vasos sanguíneos y nervios que se encuentran asociados con estos músculos (232–234). Sin embargo, la capacidad de identificar la fascia mediante ultrasonido puede mejorar el enfoque estándar de abrir la fascia y acceder al compartimiento superficial y profundo. Aunque para ello sería necesario realizar estudios clínicos para comprobar la eficacia de esta técnica. El estudio histológico muestra cómo este septum está compuesto por fibras de tejido conectivo denso dispuestas en diferentes niveles al igual que la fascia profunda.

El síndrome compartimental agudo y crónico en el compartimiento anterior normalmente se encuentra acompañada de la afectación del compartimiento lateral (146,227). Esto puede conducir a la lesión del nervio peroneo superficial. Esto significa que se ha de valorar en caso de una fasciotomía y por ello se han de conocer la distancia de su salida respecto o a la cabeza del peroné de 21,33 cm (IC95% 20.67 a 22), distancias que son similares a otros es-

tudios (111,236). Pero también como otros autores observamos una gran variabilidad en el número de divisiones del nervio (236) y su trayectoria (111). La frecuencia de estas variaciones en nuestro estudio es similar a la reportada por otros autores un 23% (237) aunque algunos estudios han encontrado solo un 8,3% (238). Por esta razón, creemos que el uso del ultrasonido debería ser obligatorio cuando se realiza una fasciotomía para evitar producir el daño iatrogénico al nervio peroneo superficial.

Con relación al estudio histológico, nuestros hallazgos en la evaluación morfométrica de la fascia fueron similares a los de otros estudios que hablaban de un grosor medio de 1mm (113). Aunque se observaron algunas diferencias en el grosor de la fascia en diferentes puntos de la pierna. Por ejemplo, en la parte superior del compartimiento anterior y posterior la fascia era más gruesa que en la parte inferior del compartimiento anterior y posterior. Además, esta diferencia de grosor era mayor en la parte posterior de la pierna, posiblemente por el mayor número de fibras de musculares del TA y del ELD. En el retináculo dorsal superior, el grosor era mayor sobre el TA que sobre el ELD, a pesar de la morfología distinta del retináculo superior. Esto puede ser debido a que el tendón del TA se ha de fijar de mayor manera para permitir los movimientos en el pie. Curiosamente, la fascia que cubre a los músculos posteriores de la pierna presenta los mayores valores de grosor respecto a todas las estudiadas en este estudio.

En el feto, este estudio confirmó la presencia de la fascia profunda rodeando la pierna, cómo se estudió que estaba presente desde las 29 semanas de desarrollo (27). Además, la fascia de los músculos posteriores era más gruesa en el feto que en el adulto y tiene a disminuir en tamaño, como se demostró en estudios previos (25).

Como en nuestro estudio cada vez son más los estudios que recomiendan el uso de la ecografía para conocer el estado de los nervios, vasos sanguíneos, músculos y fascias (193,195). Estos estudios al igual que los presentados recomienda el uso de la ecografía para guiar el abordaje quirúrgico y de esta manera incrementar la eficacia y seguridad de la misma. Pero para cualquier estudio ecográfico se necesita unos conocimientos previos anatómicos de quién utiliza la sonda ecográfica. En el caso de las fascias, es imprescindible conocer la anatomía de las fascias, los septums, compartimentos musculares, aponeurosis y aponeurosis intermusculares, al igual que la topografía muscular, nerviosa y vascular. En el caso del estudio de los nervios, el profesional ha de saber el trayecto de estos en la zona topográfica a estudiar y además ha de estar pendiente de cualquiera variación que le dé el soporte en ocasiones de posibles variaciones e incluso de la causa de una compresión nerviosa.

Esta tesis también hace referencia a la estrecha relación entre la fascia profunda y otras estructuras como los nervios, en este caso el nervio cubital, a través del estudio ecográfico, anatómico e histológico del nervio, en cadáveres donantes (180). El recorrido de este nervio a veces es comprometido en distintos puntos de la extremidad superior, con posibilidad de atrapamiento del mismo tal como describen numerosos autores y donde para su diagnóstico, el estudio ecográfico es básico porque permite visualizar cambios en la morfología de este nervio, tal como pudimos comprobar también (166,177,239). Sin embargo, existen pocas descripciones de otros posibles puntos anatómicos de atrapamiento del nervio, que pueden pasar desapercibidas, como es el punto de paso del nervio cubital por el tabique o septum medial intercompartimental, expansión medial de la fascia braquial o fascia profunda del brazo hacia el húmero; el tercio inferior del brazo, donde se encuentra el nervio asociado con la cabeza medial del tríceps; en el codo, en el punto donde el nervio se sitúa en el espacio entre las cabezas cubital y humeral de la FCC y en el tercio superior del antebrazo,

donde el nervio pasa a través de una aponeurosis intermuscular entre FCC y FSD (180). El estudio ecográfico realizado en el trabajo demostró cambios en la morfología fascicular del nervio que se podían interpretar como signos de compresión del nervio tal como otros autores refieren en estos casos (187,188). Fue el estudio anatómico que con la medición de los diámetros del nervio, antes o después de los puntos mencionados, encontró diferencias significativas en el diámetro, en varios puntos del trayecto del nervio cubital donde puede tener un atrapamiento y a veces no se tienen presentes. Quizás de este estudio cabe destacar la relación observada, tanto ecográfica como anatómicamente, del nervio cubital adherido al vientre muscular del músculo tríceps braquial por su epimisio, o la rotación del nervio sobre su propio eje antes de llegar al codo o la detección de un músculo aberrante en el codo. En este último caso, la ecografía mostró la imagen de una estructura hipocogénica que ocupaba el túnel osteofibroso similar a una estructura muscular y donde el nervio se observaba como una estructura oval anecoica heterogénea rodeada por un área hiperecogénica. La disección probó la presencia de este músculo aberrante con su inervación y vascularización y cuyo epimisio rodeaba al nervio cubital y que algunos autores lo definen como una cuarta cabeza del músculo tríceps braquial (178). En este caso el estudio histológico fue decisivo para mostrar un nervio con signos de fibrosis compatible con compresión del nervio (180). Es importante tener en cuenta estas variaciones no solo como etiología de posible compresión del nervio sino también como causa de la luxación del mismo. En este último caso también para considerar tratamientos alternativos en su compresión, dado que una transposición del nervio cubital podría empeorar los síntomas (240,241).

En todos los estudios presentados se ha demostrado que la ecografía es una muy buena técnica de imagen para el estudio del sistema musculoesquelético y las variaciones del

mismo. El estudio de las distintas fascias que cubren el cuerpo humano también puede ser visualizadas con ecografía permitiendo nuevas vías de abordaje en patologías como los síndromes compartimentales y facilitando el estudio de los nervios terminales y periféricos para hacer un diagnóstico completo de la neuropatía por atrapamiento como en el caso estudiado del nervio cubital. Por ello, es importante que los cirujanos y otros especialistas conozcan y incorporen esta técnica a la hora de valorar a un paciente en la consulta o durante el propio acto quirúrgico.

Limitaciones del estudio

Los estudios realizados y presentados son en cadáveres, sin que se disponga de su historia clínica y a veces con un número limitado de especímenes. Ambos parámetros han de considerarse porque son una limitación a la hora de extrapolar los resultados. Pero a favor de los resultados obtenidos y publicados existen muchas referencias que basan los estudios en cadáveres y al incorporar el estudio histológico en nuestra metodología se puede demostrar la anatomía microscópica de la estructura a la vez que permite detectar alteraciones de la normalidad de las estructuras como ocurrió en el estudio del nervio cubital donde demostró la alteración microscópica del nervio compatible con una compresión del mismo.

Proyectos de futuro

Se continuarán los estudios ecográficos del tejido celular subcutáneo, fascia superficial y fascia profunda en el sistema musculoesquelético, en otras zonas topográficas y sobretodo su relación con estructuras musculares y vasculonerviosas, para después poder seguir con la disección de las estructuras y toma de muestras para el estudio histológico. A la vez que se intentará seguir la misma línea de estudios en diferentes etapas del desarrollo fetal.

Todo ello nos permite contrastar los hallazgos ecográficos con la disección anatómica y poder dar respuesta a situaciones clínicas u orientar en vías de abordaje. Aunque existan las limitaciones de ser estudios en cadáveres, la utilidad está probada en numerosas referencias bibliográficas y en la práctica clínica.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1.- La fascia antebraquial o fascia profunda del antebrazo es visible y medible con ecografía y la medición de la misma coincide mayoritariamente con las mediciones obtenidas histológicamente.

2.- La fascia profunda del antebrazo forma unos tabiques aponeuróticos para los músculos superficiales del compartimento anterior y posterior del antebrazo visibles ecográficamente, que se continúan profundamente y encierran y aíslan a músculos como el flexor radial del carpo, extensor cubital del carpo, ancóneo y pueden contribuir en la aparición del síndrome compartimental del antebrazo en condiciones patológicas.

3.- El nervio mediano se encuentra envuelto por el epimisio del músculo flexor superficial de los dedos en el tercio medio del antebrazo.

4.- Los nervios terminales de los plexos nerviosos son susceptibles de ser comprimidos en puntos donde han de atravesar septum fasciales.

5.- La ecografía es una buena técnica de radiodiagnóstico para la detección de un atrapamiento nervioso y la visualización de estructuras anatómicas que puedan contribuir a dicho atrapamiento y compresión.

6.- Ante un atrapamiento nervioso del nervio cubital se han de buscar otros puntos no habituales como el paso por el tabique medial intercompartimental y la presencia de variaciones anatómicas como músculos aberrantes que puedan comprimirlo.

7.- La fascia profunda de la pierna o fascia crural da lugar, en el compartimento anterior, a gran parte del origen del músculo tibial anterior de forma discontinua e intermitente y es posible observarlo con un estudio ecográfico, anatómico e histológico.

8.- La gran extensión de origen del tibial anterior en la fascia crural puede contribuir a ser el más afectado en un síndrome compartimental anterior.

9.- Los músculos profundos del compartimento posterior de la pierna están tabicados por un septum específico que los aísla desde la zona más distal hasta el tercio superior de la pierna.

10.- Este septum posterior está formado por capas de tejido conectivo denso, que adoptan diferentes direcciones y es visible como una línea hiperecogénica en el estudio ecográfico.

BIBLIOGRAFIA

1. Adstrum S, Nicholson H. A history of fascia. *Clin Anat*. 2019; 32(7):862–70.
2. Benjamin M. The fascia of the limbs and back - A review. *J Anat*. 2009; 214(1):1-18.
3. Findley TW. Fascia research II: Second international fascia research congress. *Int J Ther Massage Bodywork: Research, Education, and Practice*. 2009; 2(2):1-6.
4. Allen WE. Terminologia anatomica: international anatomical terminology and Terminologia Histologica: International Terms for Human Cytology and Histology. *J Anat*. 2009; 215(2):221.
5. Langevin HM, Huijing PA. Communicating about fascia: History, pitfalls, and recommendations. *Int J Ther Massage Bodywork: Research, Education, and Practice*. 2009; 2(4):3-8.
6. Findley TW. Fascia Research from a Clinician/Scientist's Perspective. *Int J Ther Massage Bodywork: Research, Education, & Practice*. 2011; 4(4):1-6.
7. Langevin HM. Connective tissue: A body-wide signaling network? *Med Hypotheses*. 2006; 66(6):1074-7.
8. Stecco C, Sfriso MM, Porzionato A, Rambaldo A, Albertin G, Macchi V, et al. Microscopic anatomy of the visceral fasciae. *J Anat*. 2017; 231(1):121-8.
9. Langevin HM, Cornbrooks CJ, Taatjes DJ. Fibroblasts form a body-wide cellular network. *Histochem Cell Biol*. 2004; 122(1):7-15.
10. Lindsay M. Fascia: clinical applications for health and human performance. 1er ed. Boston (USA) Cengage Learning; 2008. 1–304 p.
11. Ingber DE. From cellular mechanotransduction to biologically inspired engineering: 2009 pritzker award lecture, BMES annual meeting October 10, 2009. In: *Ann Biomed Eng*. 2010; 38(33):1148-61.
12. Bordoni B, Marelli F, Morabito B, Castagna R. A new concept of biotensegrity incorporating liquid tissues: Blood and lymph. *J Evid-Based Integr Med*. 2018; 23: 2515690X18792838.
13. Bordoni B, Lintonbon D, Morabito B. Meaning of the Solid and Liquid Fascia to Reconsider the Model of Biotensegrity. *Cureus*. 2018; 10 (7): e2922.
14. Krause F, Wilke J, Vogt L, Banzer W. Intermuscular force transmission along myofascial chains: A systematic review. *J Anat*. 2016; 228 (6):910-8.
15. Wilke J, Krause F, Vogt L, Banzer W. What Is Evidence-Based About Myofascial Chains: A Systematic Review. *Arch Phys Med Rehabil*. 2016; 97(3):454–61.
16. Ferretti E, Hadjantonakis AK. Mesoderm specification and diversification: from single cells to emergent tissues. *Curr Opin Cell Biol*. 2019; 61:110-6.
17. Tani S, Chung U il, Ohba S, Hojo H. Understanding paraxial mesoderm development and sclerotome specification for skeletal repair. *Exp Mol Med*. 2020; 52(8):1166-1177.
18. Prummel KD, Nieuwenhuize S, Mosimann C. The lateral plate mesoderm. *Development*. 2020; 147(12): dev175059.
19. Thiery JP, Acloque H, Huang RYJ, Nieto MA. Epithelial-Mesenchymal Transitions in Development and Disease. *Cell*. 2009; 139(5):871–90.
20. Moore K.L., Persaud T.V.N. Embriología clínica. Sexta edición. Philadelphia: Mc Graw Hill ; 1999. 50-77. Vol 1. Formación del disco embrionario bilaminar y del saco coriónico.

21. Le Douarin NM, Couly G, Creuzet SE. The neural crest is a powerful regulator of pre-otic brain development. *Dev Biol.* 2012; 366(1):74–82.
22. Moreau C, Caldarelli P, Rocancourt D, Roussel J, Denans N, Pourquie O, et al. Timed Collinear Activation of Hox Genes during Gastrulation Controls the Avian Forelimb Position. *Curr Biol.* 2019; 29(1):35-50.
23. Nishimoto S, Logan MPO. Subdivision of the lateral plate mesoderm and specification of the forelimb and hindlimb forming domains. *Semin Cell Dev Biol.* 2016; 4:102-8.
24. Tanaka M. Fins into limbs: Autopod acquisition and anterior elements reduction by modifying gene networks involving 5'Hox, Gli3, and Shh. *Dev Biol.* 2016; 413 (1):1-7.
25. Pirri C, Petrelli L, Pérez-Bellmunt A, Ortiz-Miguel S, Fede C, De Caro R, et al. Fetal Fascial Reinforcement Development: From “a White Tablet” to a Sculpted Precise Organization by Movement. *Biology (Basel).* 2022; 11(5):735.
26. Cho KH, Jang HS, Abe H, Yamamoto M, Murakami G, Shibata S. Fetal Development of Fasciae around the Arm and Thigh Muscles: A Study Using Late Stage Fetuses. *Anat Rec.* 2018; 301(7):1235-1243.
27. Blasi M, Blasi J, Domingo T, Pérez-Bellmunt A, Miguel-Pérez M. Anatomical and histological study of human deep fasciae development. *Surg Radiol Anat.* 2015; 37(6):571-8.
28. Shaw HM, Vázquez OT, McGonagle D, Bydder G, Santer RM, Benjamin M. Development of the human Achilles tendon enthesis organ. *J Anat.* 2008; 213(6):718-24.
29. Kardon G, Harfe BD, Tabin CJ. A Tcf4-Positive Mesodermal Population Provides a Prepattern for Vertebrate Limb Muscle Patterning. *Dev Cell.* 2003; 5(6):937–44.
30. Mathew SJ, Hansen JM, Merrell AJ, Murphy MM, Lawson JA, Hutcheson DA, et al. Connective tissue fibroblasts and Tcf4 regulate myogenesis. *Development.* 2011; 138(2): 371-84.
31. Findley T, Chaudhry H, Stecco A, Roman M. Fascia research - A narrative review. *J Bodyw Mov Ther.* 2012; 16(1):67-75.
32. Stecco C, Macchi V, Porzionato, Duparc F, De Caro R. The fascia: The forgotten structure. *Ital J Anat Embryol.* 2011; 116(3):127-38.
33. Hwang K, Choi JH. Superficial Fascia in the Cheek and the Superficial Musculoaponeurotic System. *J Craniofac Surg.* 2018; 29(5):1378-1382.
34. Deschênes D, Couture P, Dupont P, Tchernof A. Subdivision of the subcutaneous adipose tissue compartment and lipid-lipoprotein levels in women. *Obes Res.* 2003; 11(3):469-76.
35. Nash LG, Phillips MN, Nicholson H, Barnett R, Zhang M. Skin Ligaments: Regional Distribution and Variation in Morphology. *Clin Anat.* 2004; 17(4):287-93.
36. Abu-Hijleh MF, Roshier AL, Al-Shboul Q, Dharap AS, Harris PF. The membranous layer of superficial fascia: Evidence for its widespread distribution in the body. *Surg Radiol Anat.* 2006; 28(6):606-19.
37. Pirri C, Fede C, Petrelli L, Guidolin D, Fan C, De Caro R, et al. Elastic Fibres in the subcutaneous tissue: Is there a difference between superficial and muscular fascia? A cadaver study. *Skin Res Technol.* 2022; 28(1):21-27.
38. Caggiati A. Fascial relationships of the short saphenous vein. *J Vasc Surg.* 2001; 34(2):241-6.

39. Paoletti S. Las fascias. El papel de los tejidos en la mecánica humana. 1ª edición. Barcelona. Paidotribo; 2004; 127–167.
40. Hauck G, Castenholz A. Contribution of prelymphatic structures to lymph drainage. *Z Lymphol.* 1992; 16(1):6-9.
41. Festa E, Fretz J, Berry R, Schmidt B, Rodeheffer M, Horowitz M, et al. Adipocyte Lineage Cells Contribute to the Skin Stem Cell Niche to Drive Hair Cycling. *Cell.* 2011; 146(5):761–71.
42. Schmidt BA, Horsley V. Intradermal adipocytes mediate fibroblast recruitment during skin wound healing. *Development.* 2013; 140(7):1517-27.
43. Kasza I, Suh Y, Wollny D, Clark RJ, Roopra A, Colman RJ, et al. Syndecan-1 Is Required to Maintain Intradermal Fat and Prevent Cold Stress. *PLoS Genet.* 2014; 10(8):e1004514.
44. Alexander CM, Kasza I, Yen CLE, Reeder SB, Hernando D, Gallo RL, et al. Dermal white adipose tissue: A new component of the thermogenic response. *J Lipid Res.* 2015; 56(11):2061-9.
45. Zhang L, Guerrero-Juarez CF, Hata T, Bapat SP, Ramos R, Plikus M V., et al. Innate immunity. Dermal adipocytes protect against invasive *Staphylococcus aureus* skin infection. *Science.* 2015; 2;347(6217):67–71.
46. Brembilla NC, Boehncke WH. Dermal adipocytes' claim for fame in psoriasis. *Exp Dermatol.* 2017; 26(5):392-3.
47. Kruglikov IL, Scherer PE. Skin aging: Are adipocytes the next target? *Aging.* 2016; 8(7):1457-69.
48. Marangoni RG, Korman BD, Wei J, Wood TA, Graham L V., Whitfield ML, et al. Myofibroblasts in murine cutaneous fibrosis originate from adiponectin-positive intradermal progenitors. *Arthritis Rheumatol.* 2015; 67(4):1062-73.
49. Gierloff M, Stöhring C, Buder T, Wiltfang J. The subcutaneous fat compartments in relation to aesthetically important facial folds and rhytides. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2012; 65(10):1292-7.
50. Pavan PG, Pachera P, Stecco C, Natali AN. Biomechanical behavior of human crural fascia in anterior and posterior regions of the lower limb. *Med Biol Eng Comput.* 2015; 53(10):951-9.
51. Kirchgessner T, Tamigneaux C, Acid S, Perlepe V, Lecouvet F, Malghem J, et al. Fasciae of the musculoskeletal system: MRI findings in trauma, infection and neoplastic diseases. *Insights Imaging.* 2019; 10(1):47.
52. Lockwood TE. Superficial fascial system (SFS) of the trunk and extremities: a new concept. *Plast Reconstr Surg.* 1991; 87(6):1009–18.
53. Le Gros Clark WE. The Tissues of the Body: An Introduction to the Study of Anatomy . 1ª edición. Oxford: Published by Oxford: Clarendon Press; 1946: 1-415.
54. Fede C, Petrelli L, Pirri C, Neuhuber W, Tiengo C, Biz C, et al. Front Neuroanat. Innervation of human superficial fascia. 2022; 16:981426.
55. Glatte P, Buchmann SJ, Hijazi MM, Illigens BMW, Siepmann T. Architecture of the Cutaneous Autonomic Nervous System. *Front Neurol.* 2019; 10:970.
56. Larsson M, Nagi SS. Role of C-tactile fibers in pain modulation: animal and human perspectives. *Curr Opin Behav Sci.* 2022; 43:138-44.

57. Bhowmick S, Singh A, Flavell RA, Clark RB, O'Rourke J, Cone RE. The sympathetic nervous system modulates CD4+FoxP3+ regulatory T cells via a TGF- β -dependent mechanism. *J Leukoc Biol.* 2009; 86(6):1275-83.
58. Schleip R, Gabbiani G, Wilke J, Naylor I, Hinz B, Zorn A, et al. Fascia is able to actively contract and may thereby influence musculoskeletal dynamics: A histochemical and mechanographic investigation. *Front Physiol.* 2019; 10:336.
59. Stecco C. *Functional Atlas of the Human Fascial System*, 1st Edition. Edinburgh: Churchill Livingstone Elsevier. 2015..
60. Stecco A, Stern R, Fantoni I, De Caro R, Stecco C. Fascial Disorders: Implications for Treatment. *PM R.* 2016; 8(2):161-8.
61. Adstrum S, Hedley G, Schleip R, Stecco C, Yucesoy CA. Defining the fascial system. *J Bodyw Mov Ther.* 2017; 21(1):173-177.
62. Langevin H. Langevin's response to Stecco's fascial nomenclature editorial. *J Bodyw Mov Ther.* 2014; 18(3):444.
63. Stecco C. Why are there so many discussions about the nomenclature of fasciae? *J Bodyw Mov Ther.* 2014; 18(3):441-2.
64. Schleip R, Hedley G, Yucesoy CA. Fascial nomenclature: Update on related consensus process. *Clin Anat.* 2019; 32(7):929-933.
65. Schleip R, Jäger H, Klingler W. What is "fascia"? A review of different nomenclatures. *J Bodyw Mov Ther.* 2012; 16(4):496–502.
66. Fraser JRE, Laurent TC, Laurent UBG. Hyaluronan: Its nature, distribution, functions and turnover. In: *J Intern Med.* 1997; 242(1):27-33.
67. Stecco C, Stern R, Porzionato A, MacChi V, Masiero S, Stecco A, et al. Hyaluronan within fascia in the etiology of myofascial pain. *Surg Radiol Anat.* 2011; 33(10):891-6.
68. Pavan PG, Stecco A, Stern R, Stecco C. Painful connections: Densification versus fibrosis of fascia. *Curr Pain Headache Rep.* 2014; 18(8):441.
69. Pirri C, Fede C, Petrelli L, Guidolin D, Fan C, De Caro R, et al. An anatomical comparison of the fasciae of the thigh: A macroscopic, microscopic and ultrasound imaging study. *J Anat.* 2021; 238(4):999-1009.
70. Fede C, Pirri C, Fan C, Petrelli L, Guidolin D, De Caro R, et al. A closer look at the cellular and molecular components of the deep/muscular fasciae. Vol. 22, *Int J of Mol Sci.* 2021; 22(3):1411.
71. Soliman H, Tung LW, Rossi FM V. Fibroblast and Myofibroblast Subtypes: Single Cell Sequencing. *Methods Mol Biol.* 2021; 2299:49–84.
72. Manon-Jensen T, Kjeld NG, Karsdal MA. Collagen-mediated hemostasis. *J Thromb Haemost.* 2016; 14(3):438-48.
73. Beam J, Botta A, Ye J, Soliman H, Matier BJ, Forrest M, et al. Excess Linoleic Acid Increases Collagen I/III Ratio and "Stiffens" the Heart Muscle Following High Fat Diets. *J Biol Chem.* 2015; 290(38):23371–84.

74. Brown SR, Cleveland EM, Deeken CR, Huitron SS, Aluka KJ, Davis KG. Type I/type III collagen ratio associated with diverticulitis of the colon in young patients. *J Surg Res.* 2017; 207:229–34.
75. Kisling A, Lust RM, Katwa LC. What is the role of peptide fragments of collagen I and IV in health and disease? *Life Sci.* 2019; 228:30-4.
76. Schleip R, Klingler W, Lehmann-Horn F. Active fascial contractility: Fascia may be able to contract in a smooth muscle-like manner and thereby influence musculoskeletal dynamics. *Med Hypotheses.* 2005; 65(2):273-7.
77. Hinz B, Gabbiani G. Mechanisms of force generation and transmission by myofibroblasts. *Curr Opin Biotechnol.* 2003; 14(5):538-46.
78. Stecco C, Fede C, Macchi V, Porzionato A, Petrelli L, Biz C, et al. The fasciocytes: A new cell devoted to fascial gliding regulation. *Clin Anat.* 2018; 31(5):667-76.
79. Zhang AY, Kargel JS. The Basic Science of Dupuytren Disease. *Hand Clin.* 2018; 34(3):301-5.
80. Gabbiani G. Evolution and clinical implications of the myofibroblast concept. *Cardiovasc Res.* 1998; 38(3):545-8.
81. Benjamin M, Ralphs JR. Fibrocartilage in tendons and ligaments - An adaptation to compressive load. *J Anat.* 1998; 193:481-94.
82. Dawidowicz J, Szotek S, Matysiak N, Mielańczyk L, Maksymowicz K. Electron microscopy of human fascia lata: Focus on telocytes. *J Cell Mol Med.* 2015; 19(10):2500-6.
83. Dawidowicz J, Matysiak N, Szotek S, Maksymowicz K. Telocytes of fascial structures. *Adv Exp Med and Biol.* 2016; 913:403-24.
84. Blottner D, Huang Y, Trautmann G, Sun L. The fascia: Continuum linking bone and myofascial bag for global and local body movement control on Earth and in Space. A scoping review. *REACH.* 2019; 14–15:100030.
85. Chaitow L. Telocytes: Connective tissue repair and communication cells. Vol. 21, *J Bodyw Mov Ther.* 2017; 21(2):231-3.
86. Theocharis AD, Skandalis SS, Gialeli C, Karamanos NK. Extracellular matrix structure. Vol. 97, *Adv Drug Deliv Rev.* 2016; 97:4-27.
87. Ushiki T. Collagen fibers, reticular fibers and elastic fibers. A comprehensive understanding from a morphological viewpoint. *Arch Histol Cytol.* 2002; 65(2):109-26.
88. Benetazzo L, Bizzego A, De Caro R, Frigo G, Guidolin D, Stecco C. 3D reconstruction of the crural and thoracolumbar fasciae. *Surg Radiol Anat.* 2011; 33(10):855-62.
89. Turrina A, Martínez-González MA, Stecco C. The muscular force transmission system: Role of the intramuscular connective tissue. *J Bodyw Mov Ther.* 2013;17(1):95-102.
90. Fede C, Angelini A, Stern R, Macchi V, Porzionato A, Ruggieri P, et al. Quantification of hyaluronan in human fasciae: variations with function and anatomical site. *J Anat.* 2018; 233(4):552-6.
91. Stecco A, Macchi V, Masiero S, Porzionato A, Tiengo C, Stecco C, et al. Pectoral and femoral fasciae: Common aspects and regional specializations. *Surg Radiol Anat.* 2009; 31(1):35-42.

92. Stecco C, MacChi V, Porzionato A, Morra A, Parenti A, Stecco A, et al. The ankle retinacula: Morphological evidence of the proprioceptive role of the fascial system. *Cells Tissues Organs*. 2010; 192(3):200-10.
93. Fede C, Porzionato A, Petrelli L, Fan C, Pirri C, Biz C, et al. Fascia and soft tissues innervation in the human hip and their possible role in post-surgical pain. *J Orthop Res*. 2020; 38(7):1646-54.
94. Schilder A, Hoheisel U, Magerl W, Benrath J, Klein T, Treede RD. Sensory findings after stimulation of the thoracolumbar fascia with hypertonic saline suggest its contribution to low back pain. *Pain*. 2014; 155(2):222-31.
95. Mense S, Hoheisel U. Evidence for the existence of nociceptors in rat thoracolumbar fascia. *J Bodyw Mov Ther*. 2016; 20(3):623-8.
96. Fede C, Albertin G, Petrelli L, Sfriso MM, Biz C, De Caro R, et al. Expression of the endocannabinoid receptors in human fascial tissue. *Eur J Histochem*. 2016; 60(2):2643.
97. Lee JY, Lee GJ, Nakamura A, Lee PR, Kim Y, Won CH, et al. Involvement of cannabinoid type 1 receptor in fasting-induced analgesia. *Mol Pain*. 2020; 16:1744806920969476.
98. Nagarkatti P, Pandey R, Rieder SA, Hegde VL, Nagarkatti M. Cannabinoids as novel anti-inflammatory drugs. *Future Med Chem*. 2009; 1(7) 1333-49.
99. Mense S. Innervation of the thoracolumbar fascia. *Eur J Transl Myol*. 2020; 29(3):8297.
100. Grant JCB. *A Method of Anatomy*. 1st ed. London : Williams & Wilkins Co; 1948. 0–778 p.
101. Huijing PA, Maas H, Baan GC. Compartmental fasciotomy and isolating a muscle from neighboring muscles interfere with myofascial force transmission within the rat anterior crural compartment. *J Morphol*. 2003; 256(3):306-21.
102. Jones FW. Structure and Function as Seen in the Foot. 1949. *Clin Orthop Relat Res*. 2021; (391):3-6.
103. Stecco A, Macchi V, Stecco C, Porzionato A, Ann Day J, Delmas V, et al. Anatomical study of myofascial continuity in the anterior region of the upper limb. *J Bodyw Mov Ther*. 2009; 13(1):53-62.
104. Ortiz-Miguel S, Miguel-Pérez M, Navarro J, Möller I, Pérez-Bellmunt A, Agullo JL, et al. Compartments of the antebrachial fascia of the forearm: clinically relevant ultrasound, anatomical and histological findings. *Surg Radiol Anat*. 2021; 43(10):1569–79.
105. Stecco C, Porzionato A, Macchi V, Tiengo C, Parenti A, Aldegheri R, et al. Histological characteristics of the deep fascia of the upper limb. *Ital J Anat Embryol*. 2006; 111(2):105-10.
106. Stecco C, Porzionato A, Lancerotto L, Stecco A, Macchi V, Day JA, et al. Histological study of the deep fasciae of the limbs. *J Bodyw Mov Ther*. 2008; 12(3):225–30.
107. Ruland RT, April EW, Meinhard BP. Tibialis posterior muscle: The fifth compartment? *J Orthop Trauma*. 1992; 6(3):347-51.
108. Davey JR, Rorabeck CH, Fowler PJ. The tibialis posterior muscle compartment: An unrecognized cause of exertional compartment syndrome. *Am J Sports Med*. 1984; 12(5):391-7.
109. Kwiatkowski TC, Detmer DE. Anatomical dissection of the deep posterior compartment and its correlation with clinical reports of chronic compartment syndrome involving the deep posterior compartment. *Clin Anat*. 1997; 10(2):104-11.

110. Cheney RA, Melaragno PG, Prayson MJ, Bennett GL, Njus GO. Anatomic investigation of the deep posterior compartment of the leg. *Foot Ankle Int.* 1998; 19(2):98-101.
111. Valisena S, Gamulin A, Hannouche D. The Intraseptal Course of the Superficial Peroneal Nerve: An Anatomic Study. *Foot Ankle Int.* 2021; 42(9):1171-8.
112. Testut L., Jacob O. Anatomía topográfica con aplicaciones medicoquirúrgicas . 8ª edición. Barcelona. Salvat. 1975. Vol 2º . 1008-1029. Pierna.
113. Stecco C, Pavan PG, Porzionato A, Macchi V, Lancerotto L, Carniel EL, et al. Mechanics of crural fascia: From anatomy to constitutive modelling. *Surg Radiol Anat.* 2009; 31(7):523-9.
114. Hammoudeh DSN, Dohi T, Cho H, Ogawa R. In Vivo Analysis of the Superficial and Deep Fascia. *Plast Reconstr Surg.* 2022; 150(5):1035-44.
115. Pirri C, Pirri N, Guidolin D, Macchi V, De Caro R, Stecco C. Ultrasound Imaging of the Superficial Fascia in the Upper Limb: Arm and Forearm. *Diagnostics.* 2022; 12(8):1884.
116. Chim H, Nichols DS, Chopan M. Ultrasound for Perforator Mapping and Flap Design in the Hand and Upper Extremity. *Journal of Hand Surgery.* 2023; 48(6):595-601.
117. Pirri C, Guidolin D, Fede C, Macchi V, De Caro R, Stecco C. Ultrasound Imaging of Brachial and Antebrachial Fasciae. *Diagnostics (Basel).* 2021; 11(12):2261.
118. Romanes G.I. Cunningham. Tratado de anatomía. 12ª edición. Madrid. Ed. Interamericana-McGraw-Hill; 1987. 813–815. El sistema nervioso periférico.
119. Young B, Heath JW. Wheather’s Histología funcional. Texto Y atlas en color. 4ª edición Madrid. Ed. Harcourt. 2001.116-133. Tejidos nerviosos.
120. Bianchi S., Martinoli C. Ultrasound of the musculoskeletal system. 1st ed. New York: Ed Springer; 2007. 97–100. Nerve and blood vessels.
121. Tagliafico A, Martinoli C. Reliability of side-to-side sonographic cross-sectional area measurements of upper extremity nerves in healthy volunteers. *J Ultrasound Med.* 2013; 32(3):457-62.
122. Tagliafico A, Cadoni A, Fiscì E, Bignotti B, Padua L, Martinoli C. Reliability of side-to-side ultrasound cross-sectional area measurements of lower extremity nerves in healthy subjects. *Muscle Nerve.*2012; 46(5):717-22.
123. Bignotti B, Tagliafico A, Martinoli C. Ultrasonography of peripheral nerves: Anatomy and pathology. *Ultrasound Clin* 2014; 9: 525-36.
124. Silvestri E, Martinoli C, Derchi LE, Bertolotto M, Chiaramondia M, Rosenberg I. Echotexture of peripheral nerves: Correlation between US and histologic findings and criteria to differentiate tendons. *Radiology.* 1995; 197(1):291-6.
125. Gourgiotis S, Villias C, Germanos S, Foukas A, Ridolfini MP. Acute limb compartment syndrome: a review. *J Surg Educ.* 2007; 64(3):178–86.
126. Olson SA, Glasgow RR. Acute compartment syndrome in lower extremity musculoskeletal trauma. *J Am Acad Orthop Surg.* 2005; 13(7):436-44.
127. Holden CEA. The pathology and prevention of Volkmann’s ischaemic contracture. *J Bone Joint Surg Br.*1979; 61-B(3):296-300.

128. Duran WN, Takenaka H, Hobson RW. Microvascular pathophysiology of skeletal muscle ischemia-reperfusion. *Semin Vasc Surg.* 1998; 11(3):203-14.
129. Mauser N, Gissel H, Henderson C, Hao J, Hak D, Mauffrey C. Acute lower-leg compartment syndrome. *Orthopedics.* 2013; 36(8):619-24.
130. Blaisdell F. The pathophysiology of skeletal muscle ischemia and the reperfusion syndrome: a review. *Cardiovasc Surg.* 2002; 10(6):620-30.
131. Elliott KGB, Johnstone AJ. Diagnosing acute compartment syndrome. *J Bone Joint Surg Br.* 2003; 85(5):625–32.
132. Whitesides TE, Heckman MM. Acute Compartment Syndrome: Update on Diagnosis and Treatment. *J Am Acad Orthop Surg.* 1996; 4(4):209-18.
133. Hargens AR, Romine JS, Sipe JC, Evans KL, Mubarak SJ, Akesson WH. Peripheral nerve-conduction block by high muscle-compartment pressure. *J Bone Joint Surg Am.* 1979; 61(2): 192-200.
134. British Orthopaedic Association BAOPraAS, Royal College of Nursing. BOAST 10: Diagnosis and management of compartment syndrome of the limbs. *Br Orthopaedic Assoc Stand Trauma.* 2014. <http://www.boa.ac.uk/publications7oa-standards-trauma-boast>.
135. RORABECK CH, CLARKE KM. The Pathophysiology of the Anterior Tibial Compartment Syndrome. *J Trauma.* 1978; 18(5):299–304.
136. McMillan TE, Gardner WT, Schmidt AH, Johnstone AJ. Diagnosing acute compartment syndrome—where have we got to? *Int Orthop.* 2019; 43(11):2429-2435.
137. Leversedge FJ, Moore TJ, Peterson BC, Seiler JG. Compartment syndrome of the upper extremity. *J Hand Surg Am.* 2011; 36(3):544-59.
138. Roberts CS, Gorczyca JT, Ring D, Pugh KJ. Diagnosis and treatment of less common compartment syndromes of the upper and lower extremities: current evidence and best practices. *Instr Course Lect.* 2011; 60:43-50.
139. Hwang RW, de Witte PB, Ring D. Compartment Syndrome Associated with Distal Radial Fracture and Ipsilateral Elbow Injury. *J Bone Joint Surg Am.* 2009; 91(3):642-5.
140. Dyer G, Lozano-Calderon S, Gannon C, Baratz M, Ring D. Predictors of Acute Carpal Tunnel Syndrome Associated With Fracture of the Distal Radius. *J Hand Surg Am.* 2008; 33(8):1309-13.
141. Kim JYS, Schierle CF, Subramanian VS, Birman M V., Kloeters O, Forte AJV, et al. A prognostic model for the risk of development of upper extremity compartment syndrome in the setting of brachial artery injury. *Ann Plast Surg.* 2009; 62(1):22-7.
142. Blick SS, Brumback RJ, Poka A, Burgess AR, Ebraheim NA. Compartment syndrome in open tibial fractures. *J Bone Joint Surg Am.* 1986; 68(9):1348-53.
143. McQueen MM, Gaston P, Court-Brown CM. Acute compartment syndrome. Who is at risk? *J Bone Joint Surg Br.* 2000; 82(2):200-3.
144. de Bruijn J, Winkes M, van Eerten P, Scheltinga M. Chronic exertional compartment syndrome as a cause of anterolateral leg pain. *Unfallchirurg.* 2020; 123(Suppl 1):8–14.
145. Mubarak SJ, Hargens AR. Acute Compartment Syndromes. *Surg Clin North Am.* 1983; 63(3):539–65.

146. Braver RT. Chronic Exertional Compartment Syndrome. *Clin Podiatr Med Surg*. 2016; 33(2):219–33.
147. Chan PSH, Steinberg DR, Pepe MD, Beredjiklian PK. The significance of the three volar spaces in forearm compartment syndrome: A clinical and cadaveric correlation. *J Hand Surg Am*. 1998; 23(6):1077-81.
148. Havig MT, Leversedge FJ, Seiler JG. Forearm compartment pressures: An in vitro analysis of open and endoscopic assisted fasciotomy. *J Hand Surg Am*. 1999; 24(6):1289-97.
149. Liu B, Barrazaeta G, Ruchelsman DE. Chronic Exertional Compartment Syndrome in Athletes. *J Hand Surg Am*. 2017; 42(11):917–23.
150. Schwartz JT, Waters PM, Simmons BP. Endoscopic carpal tunnel release: a cadaveric study. *Arthroscopy*. 1993; 9(2):209–13.
151. Fontes D, Clement R, Roure P. L'aponévrotomie endoscopique dans les syndromes de loges chroniques d'effort à l'avant-bras : à propos de 41 cas. *Chir Main*. 2003; 22(4):186-96.
152. Ruyer J, Rutka V, Garret J, Rizzo C, Guigal V. Endoscopic fasciotomy for chronic exertional compartment syndrome of the forearm: Clinical results of a new technique using an endoscopic carpal tunnel release device. *Hand Surg Rehabil*. 2020; 39(3):154-8.
153. Pozzi A, Pivato G, Kask K, Susini F, Pegoli L. Single portal endoscopic treatment for chronic exertional compartment syndrome of the forearm. *Tech Hand Up Extrem Surg*. 2014; 18(3):153-6.
154. Harrison JWK, Thomas P, Aster A, Wilkes G, Hayton MJ. Chronic exertional compartment syndrome of the forearm in elite rowers: A technique for mini-open fasciotomy and a report of six cases. *Hand (N Y)*. 2013; 8(4):450-3.
155. Barrera-Ochoa S, Haddad S, Correa-Vázquez E, Font Segura J, Gil E, Lluch A, et al. Surgical Decompression of Exertional Compartment Syndrome of the Forearm in Professional Motorcycling Racers: Comparative Long-term Results of Wide-Open Versus Mini-Open Fasciotomy. *Clin J Sport Med*. 2016; 26(2):108–14.
156. Winkes MB, Luiten EJT, Van Zoest WJF, Sala HA, Hoogeveen AR, Scheltinga MR. Long-term results of surgical decompression of chronic exertional compartment syndrome of the forearm in motocross racers. *Am J Sports Med*. 2012; 40(2):452-8.
157. Winkes MB, Teijink JA, Scheltinga MR. Motorcycle racer with unilateral forearm flexor and extensor chronic exertional compartment syndrome. *BMJ Case Rep*. 2016; 2016:bcr20162114739.
158. Puranen J. The medial tibial syndrome. Exercise ischaemia in the medial fascial compartment of the leg. *J Bone Joint Surg Br*. 1974; 56-B(4):712-5.
159. Amendola A, Rorabeck CH, Vellett D, Vezina W, Rutt B, Nott L. The use of magnetic resonance imaging in exertional compartment syndromes. *Am J Sports Med*. 1990; 18(1):29–34.
160. Möller I, Miguel M, Bong DA, Zaottini F, Martinoli C. The peripheral nerves: Update on ultrasound and magnetic resonance imaging. *Clin Exp Rheumatol*. 2018; 36 Suppl 114(5):145-58.
161. Martinoli C, Miguel-Perez M, Padua L, Gandolfo N, Zicca A, Tagliafico A. Imaging of neuropathies about the hip. *Eur J Radiol*. 2013; 82(1):17-26.
162. Starr BW, Lee DS, Stern PJ. Anatomy of the Posterior Antebrachial Cutaneous Nerve, Revisited. *J Hand Surg Am*. 2020; 45(4):360.e1-360.e4.

163. García-Martínez J, Miguel-Pérez M, Pérez-Bellmunt A, Ortiz-Miguel S, Viscor G. The course of posterior antebrachial cutaneous nerve: Anatomical and sonographic study with a clinical implication. *Int J Environ Res Public Health*. 2021; 18(15):7733.
164. Barral JP, Croibier A. *Manual Therapy for the Peripheral Nerves*. 1st. Paris. Ed. Elsevier-Masson. 2009.
165. Martin R, Martin HD, Kivlan BR. Nerve Entrapment in the Hip Region: Current Concepts Review. *Int J Sports Phys Ther*. 2017; 12(7):1163-1173.
166. Miller TT, Reinus WR. Nerve entrapment syndromes of the elbow, forearm, and wrist. Vol. 195, *AJR Am J Roentgenol*. 2010; 195(3):585-94.
167. Martinoli C, Bianchi S, Pugliese F, Bacigalupo L, Gauglio C, Valle M, et al. Sonography of entrapment neuropathies in the upper limb (wrist excluded). *J Clin Ultrasound*. 2004; 32(9):438-50.
168. Draghi F, Danesino GM, de Gautard R, Bianchi S. Ultrasound of the elbow: Examination techniques and US appearance of the normal and pathologic joint. *J Ultrasound*. 2007; 10(2):76-84.
169. Barrell K, Smith AG. *Peripheral Neuropathy*. *Med Clin North Am*. 2019;103(2):383-397.
170. Testut L., Latarjet A. *Tratado de Anatomía Humana*. 1ª ed. Barcelona. Ed. Salvat Editores.1979. 1026-1064. Vol 1. Músculos del antebrazo.
171. Chadwick N, Morag Y, Smith BW, Yablon C, Kim SM, Yang LJS. Imaging appearance following surgical decompression of the ulnar nerve. *Br J Radiol*. 2019; 92(1094):20180757.
172. De Maeseneer M, Brigido MK, Antic M, Lenchik L, Milants A, Vereecke E, et al. Ultrasound of the elbow with emphasis on detailed assessment of ligaments, tendons, and nerves. *Eur J Radiol*. 2015; 84(4):671-81.
173. Granger A, Sardi JP, Iwanaga J, Wilson TJ, Yang L, Loukas M, et al. Osborne's Ligament: A Review of its History, Anatomy, and Surgical Importance. *Cureus*. 2017; 9(3):e1080.
174. Martinoli C, Bianchi S, Gandolfo N, Valle M, Simonetti S, Derchi LE. US of nerve entrapments in osteofibrous tunnels of the upper and lower limbs. *Radiographics*. 2000; 20 Spec No:S199-213;discussion S213-7.
175. Shen L, Masih S, Patel DB, Matcuk GR. MR anatomy and pathology of the ulnar nerve involving the cubital tunnel and Guyon's canal. Vol. 40, *Clin Imaging*. 2016; 40(2):263-74.
176. Miguel-Pérez MI, Combalia A, Arandes JM. Abnormal innervation of the triceps brachii muscle by the ulnar nerve. Vol. 35, *J Hand Surg Eur Vol*. 2010; 35(5):430-1.
177. Gregoli B, Bortolotto C, Draghi F. Elbow nerves: Normal sonographic anatomy and identification of the structures potentially associated with nerve compression. A short pictorial-video article. *J Ultrasound*. 2013; 16(3):119-21.
178. Rao M, Somayaji S, Raghu J, Pamidi N, Swamy R. Bilateral additional slips of triceps brachii forming osseo-musculo-fibrous tunnels for ulnar nerves. *Ann Med Health Sci Res*. 2013; 3(3):450-2.
179. Fabrizio PA, Clemente FR. Variation in the triceps brachii muscle: A fourth muscular head. *Clin Anat*. 1997; 10(4):259-63.

180. Ferre-Martinez A, Miguel-Pérez M, Möller I, Ortiz-Miguel S, Pérez-Bellmunt A, Ruiz N, et al. Possible Points of Ulnar Nerve Entrapment in the Arm and Forearm: An Ultrasound, Anatomical, and Histological Study. *Diagnostics (Basel)*. 2023; 13(7):1332.
181. Palve SS, Palve SB. Impact of aging on nerve conduction velocities and late responses in healthy individuals. *J Neurosci Rural Pract*. 2018; 9(1):112-6.
182. Brown JM, Yablon CM, Morag Y, Brandon CJ, Jacobson JA. US of the peripheral nerves of the upper extremity: A landmark approach. *Radiographics*. 2016; 36(2):452-63.
183. Ghasemi-Esfe AR, Khalilzadeh O, Vaziri-Bozorg SM, Jajroudi M, Shakiba M, Mazloumi M, et al. Color and power doppler US for diagnosing carpal tunnel syndrome and determining its severity: A quantitative image processing method. *Radiology*. 2011; 261(2):499-506.
184. Wilder-Smith EP, Therimadasamy A. Color and power Doppler US for diagnosing carpal tunnel syndrome and determining its severity. Vol. 262, *Radiology*. 2012; 262(3):1043-4.
185. Bianchi S, Della Santa D, Glauser T, Beaulieu JY, Van Aaken J. Sonography of masses of the wrist and hand. *AJR Am J Roentgenol*. 2008; 191(6):1767-75.
186. Jaques G, Becce F, Ledoux JB, Durand S. Diagnosis of ulnar nerve entrapment anterior to the medial epicondyle by ultrasound elastography and diffusion tensor imaging with fiber tractography: a case report. *Surgical and Radiologic Anatomy*. 2022; 44(2):201-5.
187. Kang JH, Joo BE, Kim KH, Park BK, Cha J, Kim DH. Ultrasonographic and Electrophysiological Evaluation of Ulnar Nerve Instability and Snapping of the Triceps Medial Head in Healthy Subjects. *Am J Phys Med Rehabil*. 2017; 96(8):e141-e146.
188. Armstrong C. The architecture and spatial organization of the living human body as revealed by intratissular endoscopy - An osteopathic perspective. *J Bodyw Mov Ther*. 2020 J;24(1):138–46.
189. Schwind P, Myers T, Barral JP. *Fascial and Membrane Technique*. 1ª edicion. Londres. Ed Churchill Livingstone- Elsevier. 2006.
190. Paoletti S. *The fasciae: anatomy, dysfunction and treatment*. 1ª Seattle. Eastland Press. 2006.
191. Wilke J, Schleip R, Yucesoy CA, Banzer W. Not merely a protective packing organ? A review of fascia and its force transmission capacity. *J Appl Physiol (1985)*. 2018; 124(1):234-44.
192. Wendell-Smith CP. Fascia: An illustrative problem in international terminology. Vol. 19, *Surg Radiol Anat*. 1997; 19(5):273-7.
193. Borges ÁVRM, Souza SAL. Anatomy of the nerves, vessels, and muscular compartments of the forearm, as revealed by high-resolution ultrasound. Part 1: overall structure and forearm compartments. *Radiol Bras*. 2021; 54(6):388-97.
194. Mühlbacher J, Pauzenberger R, Asenbaum U, Gauster T, Kapral S, Herkner H, et al. Feasibility of ultrasound measurement in a human model of acute compartment syndrome. *World J Emerg Surg*. 2019; 14(1):4.
195. Borges ÁVRM, Souza SAL. Anatomy of the nerves, vessels, and muscular compartments of the forearm, as revealed by high-resolution ultrasound. Part 2: vascularization of compartments and cutaneous innervation. *Radiol Bras*. 2021; 54(6):398-405.

196. Pirri C, Fede C, Stecco A, Guidolin D, Fan C, De Caro R, et al. Ultrasound Imaging of Crural Fascia and Epimysial Fascia Thicknesses in Basketball Players with Previous Ankle Sprains Versus Healthy Subjects. *Diagnostics (Basel)*. 2021; 11(2):177.
197. Amin NH, Kumar NS, Schickendantz MS. Medial epicondylitis: evaluation and management. *J Am Acad Orthop Surg*. 2015; 23(6):348–55.
198. Briggs CA, Elliott BG. Lateral epicondylitis - A review of structures associated with tennis elbow. 1985; 7(3):149-53.
199. Karbach LE, Elfar J. Elbow Instability: Anatomy, Biomechanics, Diagnostic Maneuvers, and Testing. *J Hand Surg Am*. 2017; 42(2):118-26.
200. Saito A, Namiki Y, Okada K. Elasticity of the flexor carpi ulnaris muscle after an increased number of pitches correlates with increased medial elbow joint space suppression. *J Strength Cond Res*. 2021; 35(9):2564-71.
201. Saito A, Okada K, Shibata K, Sato H, Kamada T. High elasticity of the flexor carpi ulnaris and pronator teres muscles is associated with medial elbow injuries in youth baseball players. *Phys Sportsmed*. 2022; 50(5):440-7.
202. Eames MHA, Bain GI, Fogg QA, Van Riet RP. Distal biceps tendon anatomy: A cadaveric study. *J Bone Joint Surg Am*. 2007; 89(5):1044-9.
203. Snoeck O, Lefèvre P, Sprio E, Beslay R, Feipel V, Rooze M, et al. The lacertus fibrosus of the biceps brachii muscle: An anatomical study. *Surg Radiol Anat*. 2014; 36(7):713-9.
204. Zoner CS, Buck FM, Cardoso FN, Gheno R, Trudell DJ, Randall TD, et al. Detailed MRI-anatomic study of the lateral epicondyle of the elbow and its tendinous and ligamentous attachments in cadavers. *AJR Am J Roentgenol*. 2010; 195(3):629-36.
205. Shirato R, Wada T, Aoki M, Iba K, Kanaya K, Fujimiya M, et al. Effect of simultaneous stretching of the wrist and finger extensors for lateral epicondylitis: a gross anatomical study of the tendinous origins of the extensor carpi radialis brevis and extensor digitorum communis. *J Orthop Sci*. 2015; 20(6):1005-11.
206. Regan W, Wold LE, Coonrad R, Morrey BF. Microscopic histopathology of chronic refractory lateral epicondylitis. *Am J Sports Med*. 1992; 20(6):746-9.
207. Otoshi K, Kikuchi SI, Shishido H, Konno SI. The proximal origins of the flexor-pronator muscles and their role in the dynamic stabilization of the elbow joint: An anatomical study. *Surg Radiol Anat*. 2014; 36(3):289-94.
208. Ciccotti MG, Ramani MN. Medial epicondylitis. *Tech Hand Up Extrem Surg*. 2003; 7(4):190–6.
209. Bowen RE, Dorey FJ, Shapiro MS. Efficacy of nonoperative treatment for lateral epicondylitis. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)*. 2001; 30(8):642-6.
210. Yahia LH, Pigeon P, DesRosiers EA. Viscoelastic properties of the human lumbodorsal fascia. *J Biomed Eng*. 1993; 15(5):425-9.
211. Ojike NI, Alla SR, Battista CT, Roberts CS. A single volar incision fasciotomy will decompress all three forearm compartments: A cadaver study. *Injury*. 2012; 43(11):1949–52.

212. Benamran L, Masquelet AC. A cadaver study into the number of fasciotomies required to decompress the anterior compartment in forearm compartment syndrome. *Surg Radiol Anat.* 2018; 40(3):281-7.
213. Ronel DN, Mtui E, Nolan WB. Forearm Compartment Syndrome: Anatomical Analysis of Surgical Approaches to the Deep Space. *Plast Reconstr Surg.* 2004; 114(3):697–705.
214. Lee KJ, Jin W, Kim GY, Rhee SJ, Park SY, Park JS, et al. Sonographic features of superficial-type nodular fasciitis in the musculoskeletal system. *J Ultrasound Med.* 2015; 34(8):1465-71.
215. Meng S, Tinhofer I, Weninger WJ, Grisold W. Anatomical and ultrasound correlation of the superficial branch of the radial nerve. *Muscle Nerve.* 2014; 50(6):939-42.
216. Pirri C, Stecco C, Fede C, Macchi V, Özçakar L. Ultrasound Imaging of the Fascial Layers: You See (Only) What You Know. *J Ultrasound Med.* 2020; 39(4):827-8.
217. Degeorges R., Masquelet AC. The cubital tunnel: anatomical study of its distal part. *Surg Radiol Anat.* 2002; 24(3–4):169-76.
218. Inserra S, Spinner M. An anatomic factor significant in transposition of the ulnar nerve. *J Hand Surg Am.* 1986; 11(1):80-2.
219. Mackinnon SE, Novak CB. Operative findings in reoperation of patients with cubital tunnel syndrome. *Hand (N Y).* 2007; 2(3):137-43.
220. Standring S. *Gray's Anatomy. The Anatomical Basis of Clinical Practice*, 40th ed. Churchill Livingstone. 2008.
221. Won HS, Liu HF, Kim JH, Kwak DS, Chung IH, Kim IB. Intermuscular aponeuroses between the flexor muscles of the forearm and their relationships with the ulnar nerve. *Surg and Radiol Anat.* 2016; 38(10):1183-9.
222. Stecco C, Giordani F, Fan C, Biz C, Pirri C, Frigo AC, et al. Role of fasciae around the median nerve in pathogenesis of carpal tunnel syndrome: microscopic and ultrasound study. *J Anat.* 2020; 236(4):660-7.
223. Gaikwad MR, Ravi PK, Patnaik M. A case of potentially lethal vascular variation in association with palmaris profundus muscle. *Anat Cell Biol.* 2019; 52(3):349-53.
224. Guclu D, Arican M, Unlu EN. Median nerve entrapment due to accessory palmaris longus muscle: MRI and sonography findings. *BMJ Case Rep.* 2018; bcr2018224852.
225. Nakagawa Y, Ratkevicius A, Mizuno M, Quistorff B. ATP economy of force maintenance in human tibialis anterior muscle. *Med Sci Sports Exerc.* 2005; 37(6):937-43.
226. Shuler FD, Dietz MJ. Physicians' ability to manually detect isolated elevations in leg intracompartmental pressure. *J Bone Joint Surg Am.* 2010; 92(2):361-7.
227. Von Keudell AG, Weaver MJ, Appeltson PT, Bae DS, Dyer GSM, Heng M, et al. Diagnosis and treatment of acute extremity compartment syndrome. *Lancet.* 2015; 386(10000):1299-1310.
228. Bellamy JT, Boissonneault AR, Melquist ME, Labib SA. Release of the Tibialis Posterior Muscle Osseofascial Sheath Improves Results of Deep Exertional Compartment Syndrome Surgery: A Comparative Analysis and Long-term Results. *Orthop J Sports Med.* 2020; 8(8):2325967120942752.
229. Niechajev I. Calf augmentation and restoration. *Plast Reconstr Surg.* 2005; 116(1):295-305.

230. Turnipseed WD. Diagnosis and management of chronic compartment syndrome. *Surgery*. 2002; 132(4):613–7; discussion 617-9.
231. Detmer DE. Chronic shin splints. Classification and management of medial tibial stress syndrome. *Sports Med*. 1986; 3(6):436–46.
232. Winkes MB, Tseng CM, Pasmans HL, Van Der Cruisen-Raaijmakers M, Hoogeveen AR, Scheltinga MR. Accuracy of Palpation-Guided Catheter Placement for Muscle Pressure Measurements in Suspected Deep Posterior Chronic Exertional Compartment Syndrome of the Lower Leg: A Magnetic Resonance Imaging Study. *Am J Sports Med*. 2016; 44(10):2659-66.
233. Winkes MB, Hoogeveen AR, Scheltinga MR. Is surgery effective for deep posterior compartment syndrome of the leg? A systematic review. *Br J Sports Med*. 2014; 48(22):1592-8.
234. Winkes MB, van Zantvoort APM, de Bruijn JA, Smeets SJM, van der Cruisen-Raaijmakers M, Hoogeveen AR, et al. Fasciotomy for Deep Posterior Compartment Syndrome in the Lower Leg: A Prospective Study. *Am J Sports Med*. 2016; 44(5):1309–16.
235. Howard JL, Mohtadi NGH, Wiley JP. Evaluation of outcomes in patients following surgical treatment of chronic exertional compartment syndrome in the leg. *Clin J Sports Med*. 2000; 10(3):176-84.
236. Relvas-Silva M, Pinho AR, Lopes JG, Lixa J, Leite MJ, Sousa AN, et al. Anatomy of the superficial peroneal nerve: Can we predict nerve location and minimize iatrogenic lesion? *Morphologie*. 2021; 105(350):204-9.
237. Ducic I, Dellon AL, Graw KS. The clinical importance of variations in the surgical anatomy of the superficial peroneal nerve in the mid-third of the lateral leg. *Ann Plast Surg*. 2006; 56(6):635-8.
238. Adkison DP, Bosse MJ, Gaccione DR, Gabriel KR. Anatomical variations in the course of the superficial peroneal nerve. *J Bone Joint Surg Am*. 1991; 73(1):112-4.
239. Caetano EB, Sabongi Neto JJ, Vieira LA, Caetano MF. The arcade of Struthers: an anatomical study and clinical implications. *Rev Bras Ortop (English Edition)*. 2017; 52(3):331-6.
240. Michael AE, Young P. Is triceps hypertrophy associated with ulnar nerve luxation? *Muscle Nerve*. 2018; 58(4):523-7.
241. Pripotnev S, White C. Ulnar Nerve Neuropathy Secondary to “Snapping Triceps Syndrome.” *Plast Surg Case Stud*. 2017; 3.