Dr. Miguel Angel Reina*
Dra. Paloma Pulido**
Dr. Andrés López*

* Departamento de Anestesiología.
** Departamento de Neurocirugía.
Hospital Madrid-Montepríncipe, Madrid. España
E-mail: miguelangel@perticone.e.telefonica.net

Los trabajos fueron financiados con la Beca Nº 98-0628 del Fondo Investigación Sanitaria del Ministerio de Sanidad y Consumo, España.

El saco dural humano. Morfología de la dura-aracnoides espinal. Origen del espacio subdural espinal

Resumen

Esta revisión resume los hallazgos encontrados en el saco dural de cadáveres de recién fallecidos estudiados con diferentes técnicas histológicas. El saco dural espinal está formado por tres estructuras concéntricas: la duramadre, que ocupa el 85-90% de su espesor, del lado externo; el compartimiento subdural, integrado por células neuroteliales, y la lámina aracnoidea, que ocupa el 5 al 8% interno. La duramadre, que consta de aproximadamente 80 láminas durales concéntricas, es una estructura permeable y fibrosa, por lo cual posee resistencia mecánica. El compartimiento subdural es una estructura concéntrica, celular, de resistencia mecánica muy baja, donde se pueden producir fisuras concéntricas por rotura de las células neuroteliales dando origen a un espacio subdural adquirido. La lámina aracnoidea es una estructura celular con mayor resistencia mecánica que el compartimiento subdural. Sus células están firmemente unidas por uniones especializadas de membrana y forman una barrera semipermeable que regula el pasaje de sustancias a través del espesor del saco dural.

Palabras Clave
saco dural
duramadre
aracnoides
espacio subdural espinal
hematomas subdurales espinales

Inglés

The human dural sac. Morphology of the spinal dura-arachnoid membrane. Origin of the spinal subdural space

Abstract

This review summarizes findings in the dural sac of recently deceased cadavers studied with various different histological techniques. The spinal dural sac comprises three concentric structures: the dura mater that makes up 85-90% of its thickness on the outside; the subdural compartment composed of neurothelial cells and the arachnoid membrane that takes up the internal 5 to 8%. The dura mater, made up of approximately 80 concentric dural membranes is a permeable and fibrous structure thus giving it mechanical resistance. The subdural compartment is a concentric, celullar structure with very low mechanical resistance and the breakage of the neurothelial cells can cause concentric fissures with consequent formation of an acquired subdural space. The aracnoid membrane is a cellular structure with greater mechanical resistance than that of the subdural compartment. Its cells are firmly held together

Key Words
Dural sac
Dura mater
Arachnoid
Spinal subdural space
Spinal subdural hematoma

by specialized membrane joints and form a semi-permeable barrier that regulates the passage of substances through the thickness of the dural sac.

Portugués

O saco dural humano. Morfologia da dura-aracnóide espinhal. Origem do espaço subdural

Resumo

Esta revisão é um resumo dos achados no saco dural de cadáveres recém-falecidos estudados com diferentes técnicas histológicas. O saco dural espinhal está formado por três estruturas concêntricas: a dura-máter, que ocupa 85-90% da sua espessura externa; o compartimento subdural, constituído por células do neurotélio e a lâmina aracnóidea, que ocupa 5-8% da parte interior. A dura-máter, que consta de aproximadamente 80 lâminas durais concêntricas, é uma estrutura permeável e fibrosa e, portanto, mecanicamente resistente. O compartimento subdural é uma estrutura concêntrica, celular, de baixa resistência mecânica, onde se podem produzir fissuras concêntricas por ruptura das células do neurotélio dando origem a um espaço subdural adquirido. A lâmina aracnóidea é uma estrutura celular com maior resistência mecânica que o compartimento subdural. Suas células estão firmemente unidas por ligações especializadas de membrana e formam uma barreira semipermeável que regula a passagem de substâncias através da espessura do saco dural.

Palavras - chave
Saco dural
Dura-máter
Aracnoides
Espaço subdural espinhal
Hematoma subdural espinhal

Introducción

El saco dural es una estructura conocida por los anestesiólogos que se evita perforar cuando se hace una anestesia epidural y se intenta perforar con una lesión mínima cuando se realiza un bloqueo subaracnoideo. Sin embargo, generalmente sólo se lo conoce por esquemas y dibujos, no siendo frecuente encontrar detalles fotograficos en los libros de anestesia. La posibilidad de explorar el saco dural humano es poco común. Es una región especialmente complicada para estudiar porque está rodeada de estructuras óseas y ligamentosas que la protegen, sumado a la dificultad de obtener biopsias de tejidos del sistema nervioso central en pacientes. El estudio en preparaciones anatómicas tratadas con solución de formaldehído es otra opción, pero es una estructura que puede ser alterada si no se tiene un cuidado especial. En las autopsias, normalmente no se estudia este tejido. Esta revisión resume los hallazgos del saco dural en muestras extraídas de cadáveres de recién fallecidos. Fueron varias las técnicas histológicas empleadas en este estudio: tinciones con hematoxilina-eosina, tricrómico de Masson, orceína, PAS (periodic acid-Schiff) diastasa combinado con azul de Alcian, técnicas de inmuhistoquímica, microscopía electrónica de transmisión y microscopía electrónica de barrido. Los detalles del material y métodos usados pueden consultarse en los trabajos originales[1-8].

Terminología

El mayor espesor de la duramadre respecto de la lámina aracnoidea ha llevado a los anatomistas del pasado a otorgar el nombre de "dural" a estructuras que estan formadas por la suma de la duramadre y la lámina aracnoidea, desempeñando esta última, en muchos casos, una función más importante. La duramadre aporta sostén y resistencia mecánica, mientras que la lámina aracnoidea retiene al líquido cefalorraquídeo (LCR) y controla el paso de moléculas. Este es el caso de denominaciones como saco dural, lesiones durales, cefalea pospunción dural.

Con respecto a la duramadre espinal, la escuela anatómica francesa describe una lámina única que forma parte del saco dural. No obstante, la escuela anatómica anglosajona considera que a partir del agujero occipital, la duramadre tiene una lámina parietal o duramadre externa que se corresponde con el periostio que recubre internamente el conducto raquídeo, y una lámina visceral o duramadre interna que se corresponde con las descripciones que hacen de la duramadre los anatomistas franceses. Para éstos, el espacio epidural espinal se encuentra entre el periostio del conducto raquídeo y la duramadre, mientras que para los autores anglosajones se encontraría entre ambas hojas de la duramadre.

Embriología

El tubo neural primitivo está rodeado por un manguito de tejido mesenquimatoso indiferente. Este mesénquima se modifica con la aparición de células reticulares que proliferan en contacto con el tejido nervioso. La duramadre deriva del mesodermo y se diferencia progresivamente a partir de la 13ª semana de gestación como una estructura fibrosa continua. A la 15ª semana de gestación, el ligamento longitudinal posterior está compuesto por láminas superficiales y profundas. En la semana 21 se observan adherencias entre la duramadre y el ligamento longitudinal posterior, especialmente a la altura de los cuerpos vertebrales. A la 32ª semana de gestación, la lámina superficial del ligamento longitudinal posterior se mantiene adherida a la duramadre. A la 39ª semana, grupos de adipocitos son identificados en el espacio epidural y la duramadre continúa adherida por algunos colgajos de colágeno y puede ser identificada con facilidad.

La duramadre podría separarse del conducto vertebral por dos factores mecánicos: el desarrollo diferencial entre la médula espinal, la columna vertebral y la duramadre, sumado a los movimientos fetales.

En estado fetal, la columna vertebral y la duramadre se desarrollan más rápido que la médula espinal. En la 13ª semana, el saco dural y el cono medular se extienden hasta la tercera vértebra coccígea. El ascenso más rápido del cono medular se produce antes de la 19ª semana de gestación y se ubica a la altura de la cuarta vértebra lumbar. No obstante, Sadler[9] considera que a la 22ª semana (final del quinto mes), el cono medular puede encontrarse a la altura de la primera vértebra sacra. En el neonato, el cono medular puede hallarse en el borde inferior de la tercera vértebra lumbar, y el saco dural en la tercera vértebra sacra.

Límites y relaciones del saco dural

Las meninges raquídeas son una prolongación de las meninges craneales. El saco dural es un cilindro hueco que contiene la médula, el bulbo y las raíces nerviosas de la cola de caballo. El saco dural está separado de la médula por el espacio subaracnoideo relleno de LCR, y del canal óseo vertebral por el espacio epidural (**FIGURAS 1 Y 2**).

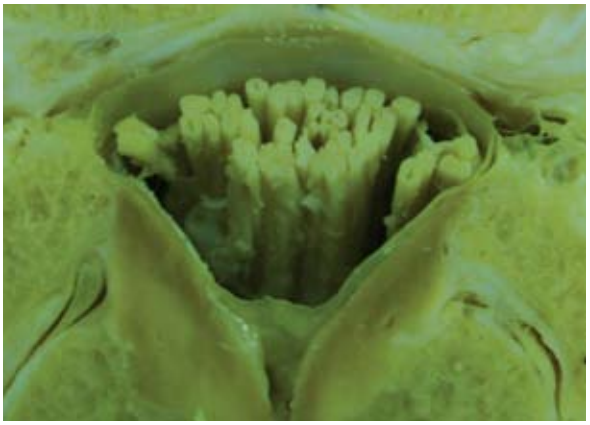

Figura 1. *Saco dural. Sección transversal de la columna lumbar en un cadáver conservado en solución de formaldehído. En la parte superior de la figura, el cuerpo vertebral limita un espacio epidural anterior estrecho; en la inferior, el espacio epidural posterior, con forma triangular, está limitado por la porción derecha e izquierda del ligamento amarillo. En el centro, se identifican raíces nerviosas de la cola de caballo con una distribución central predominante dentro del saco dural. En la zona antero-lateral derecha e izquierda, ubicada dentro del saco dural, se observa el corte de dos raíces sensitivas y una motora, que corresponde a las raíces nerviosas que se introducirían dentro de los manguitos durales en el siguiente corte anatómico. En los laterales de la imagen, el espacio epidural lateral se encuentra ocupado por grasa.*

Figura 2. *Saco dural. Sección transversal de la columna cervical en un cadáver conservado en solución de formaldehído. En el centro del saco dural, la médula está apoyada sobre su parte posterior. Los ligamentos dentados acompañan a la médula en su desplazamiento posterior. En ambos laterales del espacio epidural se observan ligamentos meningo-vertebrales que contribuyen a fijarlo.*

En el adulto, el saco dural se extiende desde el agujero occipital *(foramen magnun)* hasta la segunda o tercera vértebra sacra. El extremo superior se fija en la cara posterior de los cuerpos vertebrales de las segunda y tercera vértebra cervical y alrededor del agujero occipital. El extremo inferior se fija con el ligamento sacro-coccígeo. El *filum terminale* es un filamento de tejido conectivo de unos 20 centímetros de largo que se inicia en el extremo del cono medular. De éstos, los primeros 15 centímetros proximales a la médula están recubiertos por piamadre y aracnoides que se extienden hasta el borde caudal de la segunda vértebra sacra. Los cinco centímetros distales del *filum* externo se fusionan con la duramadre y se extienden desde el final del saco dural hasta la primera vértebra coccígea, fijándose en la zona posterior del conducto sacro. Esta porción del *filum* recibe el nombre de ligamento sacro-coccígeo o ligamento coccígeo de la médula.

En su superficie externa, el saco dural está en contacto con la grasa epidural y los plexos vasculares ubicados dentro del espacio epidural (**FIGURAS 3 Y 4**). Hay zonas de este saco dural en contacto con grasa y vasos epidurales, y otras en contacto con el periostio del conducto vertebral y con el ligamento amarillo. El saco dural no está totalmente libre dentro del conducto vertebral. Está anclado al conducto vertebral en toda su extensión por formaciones fibrosas que cruzan el espacio epidural y que se denominan ligamentos meningo-vertebrales anteriores, laterales y posteriores. Estos ligamentos también reciben otras denominaciones: los anteriores se mencionan como ligamentos de Hofmann y los posteriores como ligamentos de Giordanengo[10]. Los ligamentos de Hofmann unen el saco dural por delante al ligamento longitudinal posterior. Este último es más resistente en las regiones cervical y lumbo-sacra, siendo más débil en la región torácica. En algunos pacientes, dividen de forma incompleta al espacio epidural anterior en dos partes. Estos ligamentos anteriores tienen una orientación cráneo-caudal, sal-

vo entre la octava y novena vértebra torácica que pueden tener una dirección horizontal. Su longitud puede variar entre 0,5 a 29 mm. En la zona del fondo del saco dural, estas adherencias son más numerosas y gruesas, y forman una especie de tabique medio incompleto y fenestrado denominado ligamento sacro-dural o ligamento anterior de la duramadre de Trolard. Los fascículos más inferiores de ese tabique no se desprenden del fondo del saco dural, sino del *filum terminale* externo o ligamento sacro-coccígeo que continúa hasta fijarse en la última vértebra sacra o bien, más caudal, en la primera vértebra del cóccix.

Los ligamentos meningo-vertebrales laterales y posteriores son más delgados y no alteran la libre circulación de los líquidos inyectados dentro del espacio epidural (**FIGURAS 5 Y 6**).

Luyendijk[11] (1976) describió un pliegue del saco dural en el espacio epidural posterior. Más adelante, Blomberg[12] (1986), Savolaine y col[13] (1988) y Blomberg y Olsson[14] (1989) describieron la "*plica dorsalis medianalis*" como una estructura fibrosa longitudinal pero discontinua en la línea medio-sagital a lo largo del espacio epidural posterior, en especial en la región lumbar. Este septo fibroso del espacio epidural posterior no fue encontrado en los estudios histológicos y cortes por congelación realizados por Hogan[15,16]. Probablemente, esa estructura descrita por los anteriores autores coincida con la línea de fijación posterior de la grasa epidural posterior a través de pedículos vasculares que penetran al rafe medio de unión de la porción derecha e izquierda del ligamento amarillo.

El saco dural, por los lados, también se adhiere a los agujeros de conjunción *(foramen intervertebral)* por medio de puentes fibrosos que se extienden desde los manguitos durales. Éstos son prolongaciones tubulares que envuelven a las raíces nerviosas y al ganglio espinal (**FIGURA 3**); son cortas en la región cervical y se hacen más largas, al aumentar la oblicuidad de las raíces nerviosas, en la región lumbar. En la región cervical, donde los nervios son cortos y el movimiento vertebral es más amplio, los manguitos durales se encuentran fuertemente adheridos al periostio de las apófisis transversas adyacentes. En la región lumbosacra no existe adherencia entre la dura de los manguitos durales y el periostio del *foramen intervertebral*; el tejido adiposo permite una conexión laxa entre el espacio epidural y el compartimiento paravertebral.

El saco dural presenta en su interior una superficie interna lisa y uniforme que se corresponde con la lámina aracnoidea (**FIGURA 7**). Existen prolongaciones de tejido conectivo que unen la aracnoides laminar con la piamadre, llamadas trabeculado aracnoideo o aracnoides trabecular. Por delante y por detrás de la médula, estos

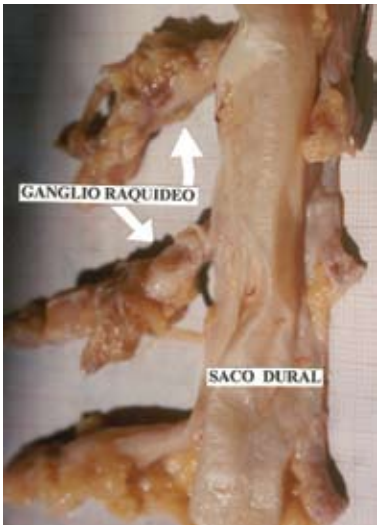

Figura 3.

Figura 4.

Figura 3. *Saco dural extraído de un cadáver después de 12 horas de haber fallecido, mantenido en cámara frigorífica. Con permiso. Publicado en Referencia 5.*

Figura 4. *Saco dural extraído de un cadáver fallecido 12 horas antes.*

Figura 5. *Espacio epidural lateral. Ligamentos meningo-vertebrales laterales. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 30x.*

Figura 6. *Saco dural. Lámina más externa del saco dural. Se observan ligamentos meningo-vertebrales posteriores cortados y plegados sobre la duramadre. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 12x. Con permiso. Publicado en referencia 4.*

filamentos miden de tres a cuatro milímetros de longitud y su dirección es antero-posterior; a los lados, la aracnoides trabecular forma una verdadera membrana, los ligamentos dentados, que en número de veintidós se desarrollan en la región torácica y fijan a la médula por sus laterales. Los ligamentos dentados presentan dos orificios para las raíces nerviosas dorsales y ventrales de los nervios raquídeos. Su borde medial se continúa con el tejido conjuntivo subpial de la médula, y el lateral forma una estructura plana triangular cuyos vértices se fijan de forma discontinua a la aracnoides laminar. Los últimos ligamentos dentados se encuentran entre la salida del decimosegundo nervio espinal dorsal y el primero lumbar. Todas estas fijaciones centran a la médula dentro el saco dural.

En ocasiones, el saco dural puede terminar en la parte media de la segunda o en la parte superior de la tercera vértebra sacra. Esta disposición es casi la misma en el niño que en el adulto; en el niño puede descender apenas unos milímetros, en la parte superior de la tercera vértebra sacra. Estos extremos se modifican muy poco en extensión o en flexión forzada.

Revestimiento perióstico del conducto raquídeo

El revestimiento del periostio tiene una ultraestructura diferente a la duramadre. Está formado por fibras de colágeno fusionadas entre sí. A diferencia de la duramadre, el espacio que hay entre las fibras de colágeno es mínimo. Cuando nos introducimos en su espesor y nos ubicamos próximo a la interfase con el hueso, esta estructura pierde el aspecto fibrilar y adquiere uno compacto, como si las fibras se fundieran[17].

Espesor del saco dural

El espesor del saco dural está formado por la duramadre en su 85-90% externo. La duramadre es una estructura fibrosa que aporta resistencia mecánica al saco dural. Por sus características, es una membrana totalmente permeable. El 5-8% interno del saco dural está formado por la lámina aracnoidea, que es celular y de menor resistencia mecánica. Esta lámina es semipermeable y regula el pasaje de sustancias a través del espesor del saco dural. Entre ambas existe un compartimiento subdural, de contenido celular y con muy baja resistencia mecánica. El saco dural es un cilindro cuyo espesor se modifica a lo largo de su extensión. Tiene un milímetro de espesor en la región cervical pero se reduce progresivamente en sentido caudal. En la región lumbar su espesor es de 0,32 mm[5] y puede variar un poco en la misma zona del saco dural. En la región lumbar y para un mismo nivel metamérico, hay diferencias entre el espesor del saco dural de la zona antero-posterior y de la zona lateral[5].

Microscopia óptica

Con diferentes técnicas histológicas se pueden determinar los componentes del saco dural.

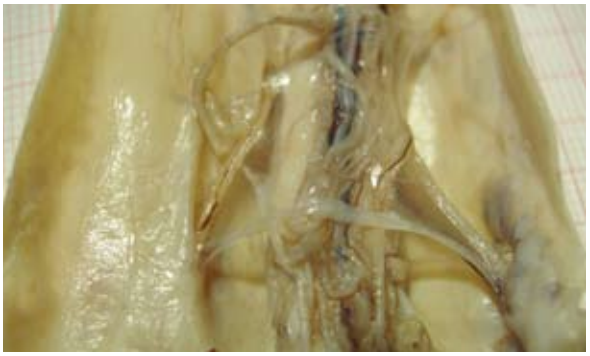

Figura 7. *Saco dural extraído de cadáver recién fallecido. El corte longitudinal permite observar su superficie interna y su contenido formado por la médula y las raíces nerviosas.*

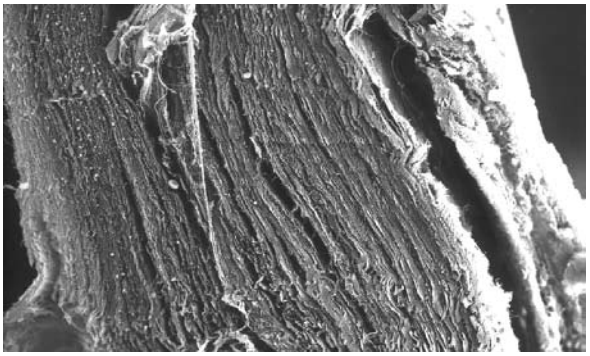

Figura 8. *Saco dural. El corte sagital permite observar el espesor completo del saco dural. Las líneas longitudinales se corresponden con el corte de las 80 láminas durales concéntricas. A la derecha de la imagen se separa la lámina aracnoidea. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 300x. Con permiso. Publicado en referencia 4.*

La tinción con hematoxilina-eosina permite diferenciar la duramadre formada por fibras de la aracnoides laminar, constituida por células aplanadas, y comprobar la presencia de algunos vasos en su espesor. La tinción de tricrómico de Masson permite ver que las fibras teñidas son fibras de colágeno; con la tinción con orceína se reconocen las fibras elásticas; con la tinción con PAS (periodic acid Schiff) diastasa, combinada con azul de Alcian, se identifican las sustancias que ocupan los espacios interfibrilares, en su mayoría proteoglicanos. Técnicas de inmuno-histoquímica usando anticuerpos de membrana epitelial ayudan a reconocer a las células de la lámina aracnoidea como células leptomeníngeas; los anticuerpos para S-100 nos ayudan a comprobar que en el espesor del saco dural no hay células grasas, y los anticuerpos anti-macrófagos permiten distinguir a los macrófagos de los componentes que forman el saco dural.

Ultraestructura del saco dural

El microscopio electrónico nos permite estudiar la ultraestructura de los tejidos. Con un microscopio electrónico de barrido se observa que el espesor de la duramadre está formado por aproximadamente 80 láminas durales concéntricas[2-4]. En la **FIGURA 8** se muestra un corte sagital del saco dural. A la derecha de la **FIGURA 8** se separa la lámina aracnoidea por efecto de la manipulación durante la disección. En un paciente, lo normal es que no exista esta separación. Cada lámina dural tiene un espesor de 5 micrones, constituido por subunidades de finas láminas –entre 8 y 12 subunidades– formadas principalmente por fibras de colágeno[2-4]. En la **FIGURA 9** se observa el detalle tridimensional de dos láminas durales formadas por subunidades laminares concéntricas. En la **FIGURA 10** se comprueba la diferente dirección de las fibras en las láminas durales vecinas. Estas fibras de colágeno se orientan en diferentes direcciones entre las subunidades que forman cada lámina dural, pero siempre dentro del plano concéntrico de cada una de ellas[1]. Las fibras no se entrecruzan entre las diferentes láminas durales[1]. En las **FIGURAS 11, 12, 13** y **14** se pueden observar, con diferentes aumentos, imágenes de microscopia electrónica de barrido de la lámina más externa de la duramadre en contacto con el espacio epidural. En la **FIGURA 11** no pueden identificarse las fibras colágenas con 50 aumentos. En las **FIGURAS 12, 13** y **14** se observa en diferentes muestras que las fibras de colágeno no tienen una dirección longitudinal y paralela al eje de la columna vertebral, como clásicamente se describía. Las fibras se entrecruzan entre sí y pueden tener una dirección longitudinal, oblicua o transversal[18-19] dentro de cada lámina dural. En la **FIGURA 14** se observan gránulos entre las fibras de colágeno que corresponden a la sustancia amorfa interfibrilar que precipita durante la preparación de las muestras. Cada fibra de colágeno mide

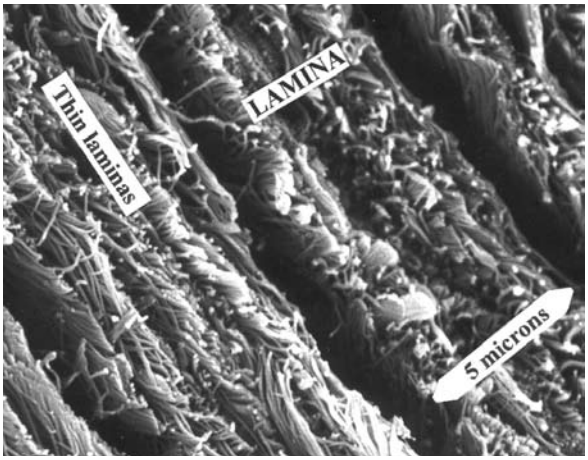

Figura 9. *Saco dural. Detalle a mayor aumento de dos láminas durales. Cada lámina dural está formada por varias subunidades laminares concéntricas. No obstante, no se entrecruzan fibras de colágeno entre las diferentes láminas durales. Las fibras de colágeno tienen diferente dirección dentro del plano de la lámina. Microscopia electrónica de barrido. Aumento 4.000x. Con permiso. Publicado en referencia 2.*

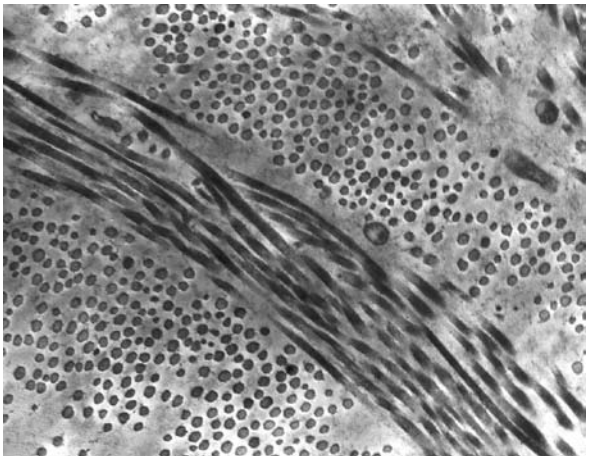

Figura 10. *Saco dural. Corte sagital que permite observar la diferente dirección de las fibras en cada lámina dural. Microscopia electrónica de transmisión. Aumento 20.000x. Con permiso. Publicado en referencia 19.*

aproximadamente 0,1 micrón y su superficie es lisa (**FIGURAS 12, 13, 14** y **15**). En la **FIGURA 15** se observan las bandas características de las fibras de colágeno en imágenes aumentadas 100.000 veces obtenidas con un microscopio electrónico de transmisión. En la duramadre, en menor proporción, se encuentran fibras elásticas de 2 micrones de diámetro y de superficie rugosa[4]. En las **FIGURAS 16** y **17** se observa una imagen tridimensional de estas fibras elásticas. En la **FIGURA 18**, el corte estudiado permite comprobar la diferente proporción entre fibras de colágeno y fibras elásticas, y sus distintos tamaños.

La superficie interna del saco dural, observada desde el espacio subaracnoideo, se muestra como una superficie lisa, continua y brillante cuando usamos un microscopio electrónico de barrido (**FIGURA 19**). Esta superficie interna corresponde a la lámina aracnoidea, membrana transparente que puede separarse de la duramadre durante la cirugía (**FIGURAS 20** y **21**). En su espesor puede observarse la médula, las raíces nerviosas y el trabeculado aracnoideo (**FIGURA 22**); mide 15 a 20 micrones y está formado por células unidas fuertemente entre sí por uniones específicas de membrana[18-19] (**FIGURA 23**). En el espacio intercelular hay fibras de colágeno que refuerzan su resistencia mecánica. Con el microscopio electrónico de transmisión comprobamos que esta lámina aracnoidea está formada por varios planos de células aracnoideas unidas entre sí por uniones especializadas de membrana de tipo desmosoma y uniones estrechas (**FIGURA 23**). Estas uniones disminuyen mucho el espacio intercelular, restringiendo el paso de sustancias hidrosolubles por sus estrechos desfiladeros. Por esta razón, la membrana aracnoidea se comporta como una membrana semipermeable que gobierna el paso de las sustancias a través del saco dural, obligando a un pasaje transcelular a aquellas sustancias que tienen un perfil lipofílico.

Mastocitos, macrófagos y fibroblastos en el espesor del saco dural

En el espesor del saco dural se pueden encontrar mastocitos, macrófagos y fibroblastos. Los mastocitos (**FIGURA 24**) miden entre 20 y 30 micrones de diámetro y presentan una morfología elíptica o redondeada con prolongaciones citoplasmáticas. Contienen varios tipos de aminas y heparinas dentro de vacuolas presentes en su citoplasma. Dines consideró que estas células pueden desempeñar su fun-

Figura 11. *Saco dural. Superficie externa de la lámina dural más externa de la duramadre. Se observan algunas fibras de colágeno plegadas sobre su superficie que pertenecen a los puentes de colágeno de los ligamentos meningo-vertebrales cortados. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 50x.*

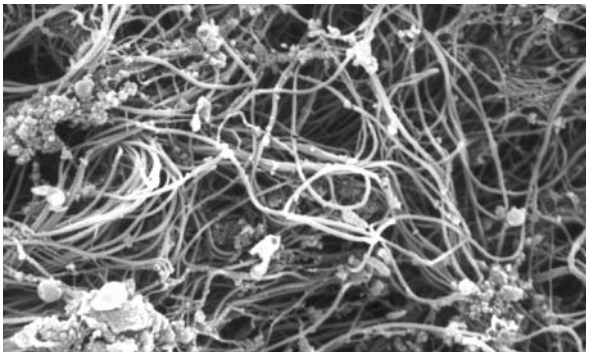

Figura 12. *Saco dural. Idem Figura 11 a mayor aumento. Se identifican fibras de colágeno y espacios entre las fibras. Estos espacios, que son un artefacto de la técnica, estarían ocupados por la sustancia amorfa fundamental, rica en proteoglicanos, que son eliminados durante la preparación de las muestras. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 6.500x. Con permiso. Publicado en referencia 3.*

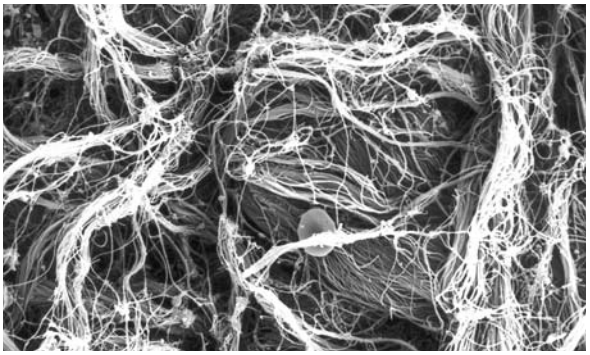

Figura 13. *Saco dural. Idem Figura 11. Nótese que las fibras no tienen una distribución longitudinal ni paralela, como clásicamente se describía. Entre ellas se encuentran algunos eritrocitos que se depositaron durante la preparación de las muestras. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 1.000x. Con permiso. Publicado en referencia 1.*

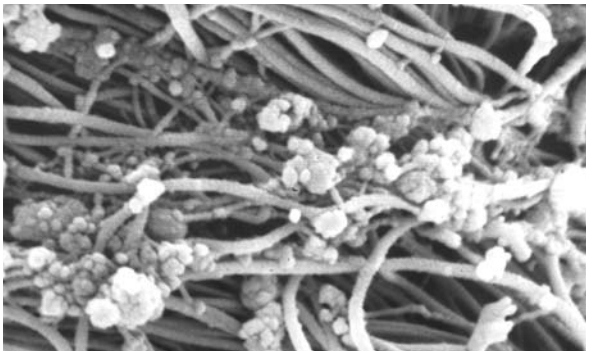

Figura 14. *Saco dural. Idem Figura 11. Fibras de colágeno que se entrecruzan dentro de un mismo plano concéntrico. Entre ellas hay grumos correspondientes a restos de la sustancia amorfa fundamental que han precipitado durante la preparación de las muestras. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 20.000x.*

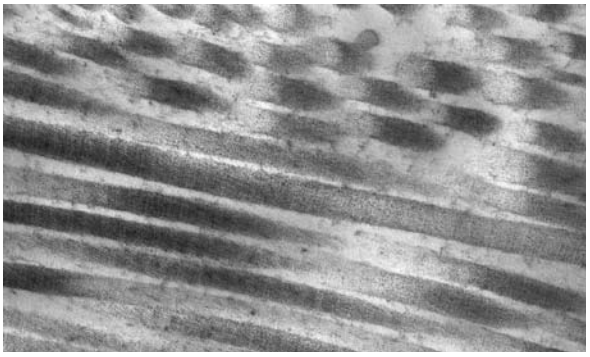

Figura 15. *Saco dural. Detalle de las fibras de colágeno. Nótese las bandas características de las fibras de colágeno a intervalos de 64 nanómetros. Microscopia electrónica de transmisión. Aumento 50.000x. Con permiso. Publicado en referencia 19.*

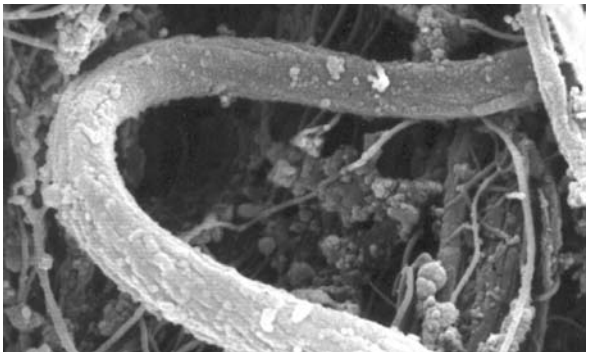

Figura 16. *Saco dural. Detalle de una fibra elástica. La superficie rugosa y el diámetro de 2 micrones le diferencia de las fibras de colágeno. En el fondo de la imagen se observan fibras de colágeno. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 7.000x. Con permiso. Publicado en referencia 1.*

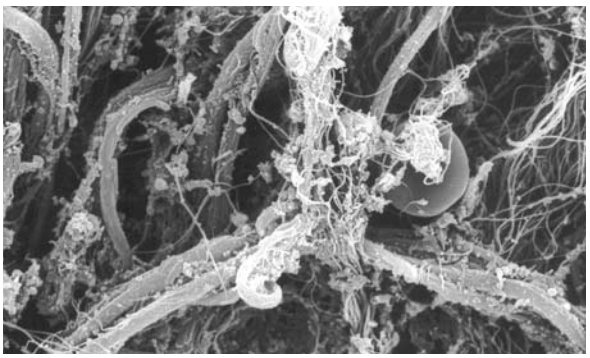

Figura 17. *Saco dural. Idem Figura 16. Fibras elásticas que se entrecruzan. En el fondo de la imagen hay fibras de colágeno y un eritrocito. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 3.000x. Con permiso. Publicado en referencia 3.*

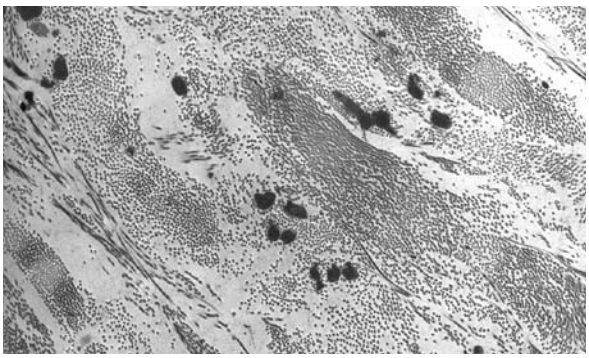

Figura 18. *Saco dural. En el corte longitudinal del saco dural se observan múltiples fibras finas de colágeno y, en menor proporción, fibras elásticas de mayor tamaño. El corte longitudinal otorga diferente forma a las fibras cortadas porque éstas se entrecruzan con diferente grado de oblicuidad. Microscopia electrónica de transmisión. Aumento 7.000x. Con permiso. Publicado en referencia 19.*

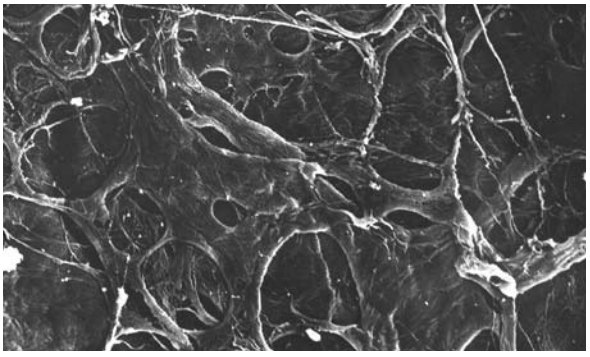

Figura 19. *Superficie interna del saco dural. Morfología de la lámina aracnoidea por microscopia electrónica de barrido. El solapamiento de los citoplasmas de las células aracnoideas con una morfología plana aporta esta imagen tridimensional. Aumento: 1.100x. Con permiso. Publicado en referencia 4.*

Figura 20. *Saco dural. Aspecto del saco dural durante una cirugía de la cola de caballo. Se secciona y diseca la duramadre intentando mantener la integridad de la lámina aracnoidea. Nótese la característica de los vasos externos de la duramadre.*

Figura 21. *Saco dural en un paciente diferente al de la Figura 20. En otra cirugía de las raíces nerviosas de la cola de caballo, se intenta disecar la duramadre manteniendo la integridad de la lámina aracnoidea que contiene al líquido cefalorraquídeo.*

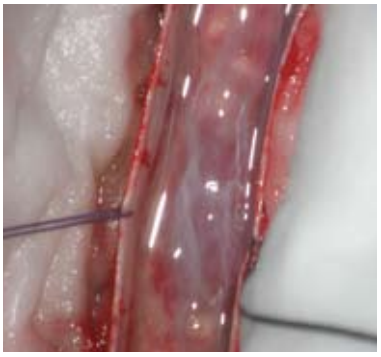

Figura 22. *Saco dural. Idem Figura 20. Terminada la disección de la duramadre iniciada en la Figura 20, y habiendo mantenido la integridad de la lámina aracnoidea, se puede observar el contenido subaracnoideo formado por las raíces de la cola de caballo y el trabeculado aracnoideo.*

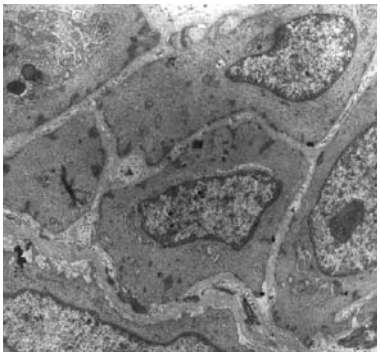

Figura 23. *Lámina aracnoidea. Detalle de las células aracnoideas. Los espacios intercelulares son mínimos. Las uniones especializadas de membrana permiten una sólida unión intercelular. Microscopia electrónica de transmisión. Aumento 4.400. Con permiso. Publicado en referencia 19.*

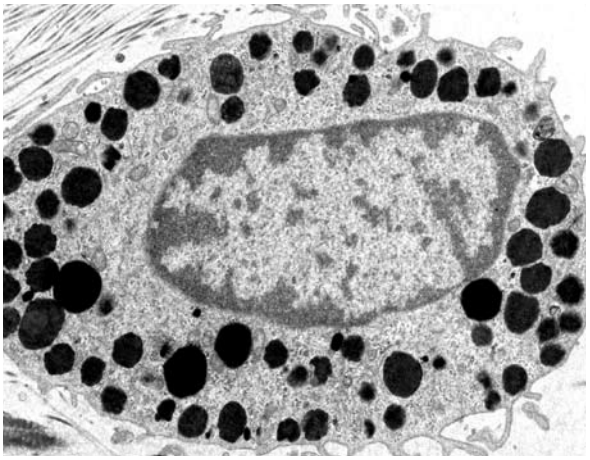

Figura 24. *Mastocito encontrado en el espesor del saco dural. En su citoplasma, abundante número de vesículas oscuras características de estas células. Microscopia electrónica de transmisión. Aumento 15.000x.*

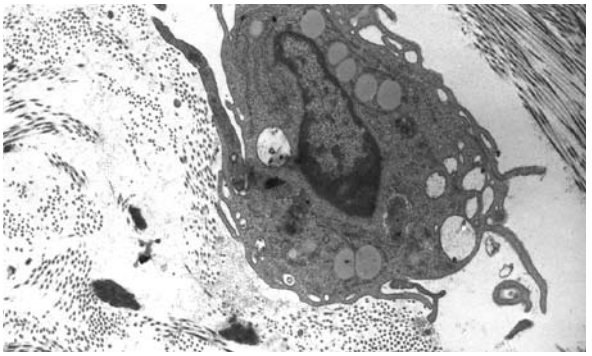

Figura 25. *Macrófago encontrado dentro del espesor del saco dural. En su citoplasma se observan abundantes fagososmas con contenido fagocitado no homogéneo. El movimiento de las prolongaciones citoplasmáticas facilita su locomoción. Las fibras de colágeno corresponden a las láminas durales. En la zona inferior de la imagen se observan fibras elásticas cortadas. Microscopia electrónica de transmisión. Aumento 7.000x. Con permiso. Publicado en referencia 19.*

ción en la hidratación del tejido nervioso. Ante una lesión nerviosa, emigran hacia el epicentro del tejido alterado y liberan las vacuolas que contienen produciendo cambios en la permeabilidad vascular y facilitando el edema y el reclutamiento de células inmunes.

En las muestras de saco dural, también se encontraron macrófagos (**FIGURA 25**), células con capacidad fágica que ayudan a mantener los tejidos normales. Los macrófagos ingieren restos de células muertas y otras partículas que entran en contacto con enzimas lisosomales. Se originan en los monocitos de la médula ósea, entran en el torrente circulatorio y emigran a través del endotelio de las vénulas poscapilares hasta alcanzar el tejido conjuntivo. Los macrófagos presentes en el tejido, en ausencia de estímulo exógeno, se llaman macrófagos residentes. Cuando se movilizan hacia una zona en respuesta a un estímulo, se denominan macrófagos provocados, y los que aumentan su capacidad de fagocitosis y de procesamiento de antígenos en respuesta a un estímulo local se llaman macrófagos activados. Los macrófagos residentes pueden adoptar forma fusiforme o estrellada y están próximos a los vasos de pequeño calibre. Se diferencian de los fibroblastos por su núcleo más pequeño y cromático y por tener un citoplasma más heterogéneo lleno de vacuolas y gránulos densos. Los macrófagos provocados y activados son de formas muy variadas. Presentan seudópodos que se extienden y retraen en su locomoción, y sobre su superficie se observan numerosas microvellosidades y pliegues ondulantes denominados lamelipodios. Estos macrófagos tienen una capacidad de pinocitosis y fagocitosis mucho mayor que la de los residentes.

En el espesor del saco dural, los fibroblastos se encuentran entre las fibras de colágeno y las fibras elásticas. La forma de estas células depende de la forma del sustrato que las contiene (cuando están entre fibras de colágeno son fusiformes). Su núcleo alargado y elíptico puede tener uno o dos nucléolos, y en sus cercanías se suele encontrar mitocondrias. Su retículo endoplásmico rugoso es escaso cuando está en una fase inactiva y muy abundante en una fase de desarrollo. Los fibroblastos contribuyen a fabricar fibras de colágeno y proteoglicanos que forman parte de la sustancia amorfa fundamental, la cual rellena los espacios interfibrilares de la duramadre.

Compartimiento subdural. Origen del espacio subdural

Hasta ahora, la aracnoides había sido considerada como una fina membrana en contacto pero no adherida a la superficie interna de

la duramadre. Entre ambas se había descrito el espacio subdural como un espacio virtual ocupado por un líquido seroso, aunque en realidad no existe como clásicamente se había descrito[6,7] (como un espacio anatómico). En su lugar hay un tejido formado por células características denominadas neuroteliales[6,7] (**FIGURA 26**). Estas células son alargadas, de hasta 100 micrones de longitud y 1 micrón de ancho, fusiformes y con extensiones ramificadas (**FIGURA 27** y **28**); son frágiles y poco adherentes entre sí, tienen pocas uniones especializadas de membrana. En el espacio intercelular hay escasas fibras de colágeno (**FIGURA 26**). Entre las células neuroteliales hay vasos de pequeño calibre que cruzan el compartimiento subdural, el cual está ocupado por dichas células y se localizaría entre la última lámina dural más interna de la duramadre y la lámina aracnoidea. En la **FIGURA 26** se observan las células neuroteliales que ocupan el compartimiento subdural, y en las **FIGURAS 27** y **28** una imagen tridimensional de estas células. Cuando este compartimiento celular se rompe se origina un espacio subdural nuevo, pequeño y con posibilidad de extenderse. Esto ocurre cuando aparecen fuerzas de tracción en el espesor del compartimiento subdural, en cuyo caso las células neuroteliales se rompen y fragmentan formándose un espacio, el espacio subdural. Estas roturas se producen siempre en el espesor del compartimiento subdural y no en los tejidos vecinos, por ser una zona de baja resistencia mecánica. Internamente, la duramadre es una zona muy reforzada por fibras de colágeno y elásticas. Externamente, la lámina aracnoidea está formada por células aracnoideas fuertemente unidas entre sí por uniones especializadas de membrana y reforzada por fibras de colágeno intercelular (**FIGURA 23**). En el compartimiento celular, como recién mencionamos, las células neuroteliales están apenas unidas entre sí y carecen de fibras de colágeno[6,7] (**FIGURA 26**).

El espacio subdural se inicia con la formación de varias fisuras paralelas y concéntricas, de las cuales una se desarrolla y aumenta su extensión formando el espacio subdural principal, y las otras quedan como espacios mínimos o subdurales secundarios[6,7] (**FIGURA 29** y **30**). En la **FIGURA 29** se representa la formación del espacio subdural, limitado internamente por la lámina aracnoidea y externamente por

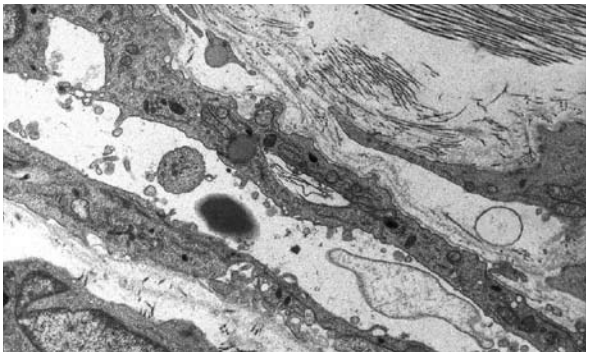

Figura 26. *Compartimiento subdural. Entre la lámina dural más interna y la lámina aracnoidea se encuentra un tejido, y no un espacio, ocupado por células alargadas y planas denominadas células neuroteliales. La unión entre estas células es escasa, encontrándose entre ellas un material flocular que dificulta su adherencia y escasas fibras de colágeno. Microscopia electrónica de transmisión. Aumento 5.000x. Con permiso. Publicado en referencia 7.*

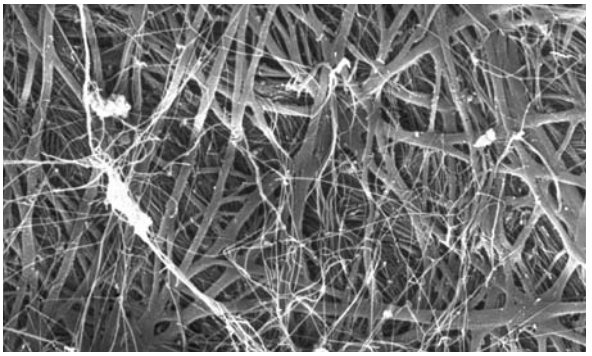

Figura 27. *Células neuroteliales. Se observan, de forma tridimensional, células aplanadas, largas y con ramificaciones de su citoplasma. Por detrás hay abundantes fibras de colágeno correspondientes a la última lámina dural más interna. Por delante se observan algunas fibras de colágeno que estarían próximas al plano de células aracnoideas que se han retirado durante la disección. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 3.000x. Con permiso. Publicado en referencia 7.*

la duramadre. La **FIGURA 30** representa en un esquema el origen del espacio subdural, que al formarse en el espesor de las células neuroteliales tendría sus superficies interna y externa revestidas por estas células.

Esto permite deducir que no es un espacio anatómico presente en todos los individuos con las características de uno virtual, sino un espacio adquirido durante un traumatismo, la inyección de un fluido en el espesor del saco dural o durante la disección quirúrgica.

Espacios virtuales de características semejantes al concepto clásico del espacio subdural y presentes desde el nacimiento son la pleura, el pericardio y el peritoneo, donde dos láminas, una parietal y otra visceral, están en contacto. Entre ambas, generalmente hay una serosidad que favorece el roce, pero no hay tejido ni puentes fibrosos que las unan. En estos espacios es posible que haya un pequeño deslizamiento de una lámina sobre la otra. El espacio epidural es otro ejemplo de espacio virtual, aunque también tiene un componente de espacio real ocupado por grasa y vasos epidurales. El clásicamente denominado espacio subdural, a diferencia, es un compartimiento subdural concéntrico al saco dural ocupado por un tejido. Cuando este último se produce, no ocupa la extensión cilíndrica de todo el saco dural como ocurriría con la clásica descripción del espacio subdural. Su extensión es limitada y depende de las causas que motiven su origen[20]. Para los anestesiólogos, el espacio subdural tiene importancia en relación con el bloqueo anestésico subdural accidental, que se produce tras la administración accidental de anestésicos locales en el espesor del saco dural y responde a una clínica atípica de bloqueo, en cuanto a su extensión y distribución. Esta clínica es difícil de explicar con las descripciones tradicionales del espacio subdural, pero perfectamente explicable si los anestésicos locales se distribuyen coincidentemente con la extensión de la disección y origen del espacio subdural adquirido en ese momento[20].

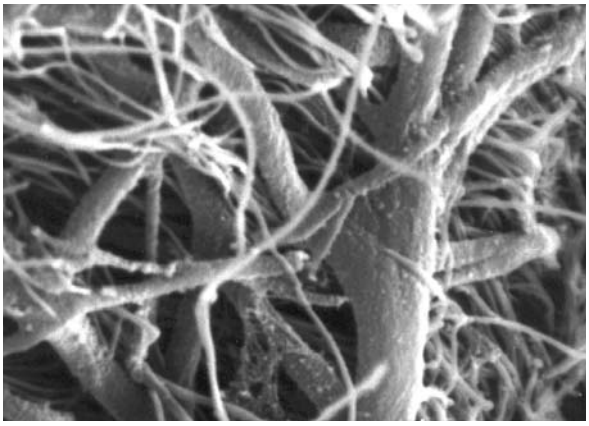

Figura 28. *Células neuroteliales. Detalle tridimensional a mayor aumento. Nótese las ramificaciones del citoplasma. Las fibras de colágeno que se observan por detrás de las células neuroteliales corresponden a la última lámina dural más interna de la duramadre. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 15.000x. Con permiso. Publicado en referencia 6.*

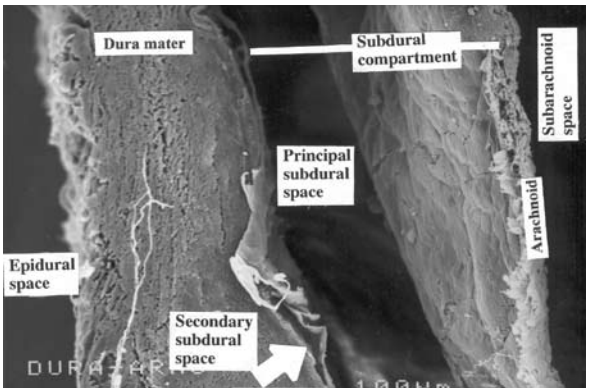

Figura 29. *Origen del espacio subdural. A la derecha de la imagen, la lámina aracnoidea de menor espesor, y a la izquierda, la duramadre, de mayor espesor. La rotura de las células neuroteliales permite que la lámina aracnoidea se separe de las láminas durales. Se producen varias roturas concéntricas de células neuroteliales dando origen a varios espacios subdurales concéntricos. El crecimiento en extensión de uno de ellos hace que el resto de espacios subdurales, que denominaremos secundarios, interrumpan su crecimiento. Sobre la superficie interna de la duramadre se observan dos espacios subdurales secundarios en la zona inferior y superior de la imagen. El método de preparación de la muestra no permite identificar a las láminas durales como en las Figuras 8 y 9. El conjunto de láminas durales se observa como una estructura maciza continua. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 180x. Con permiso. Publicado en referencia 6.*

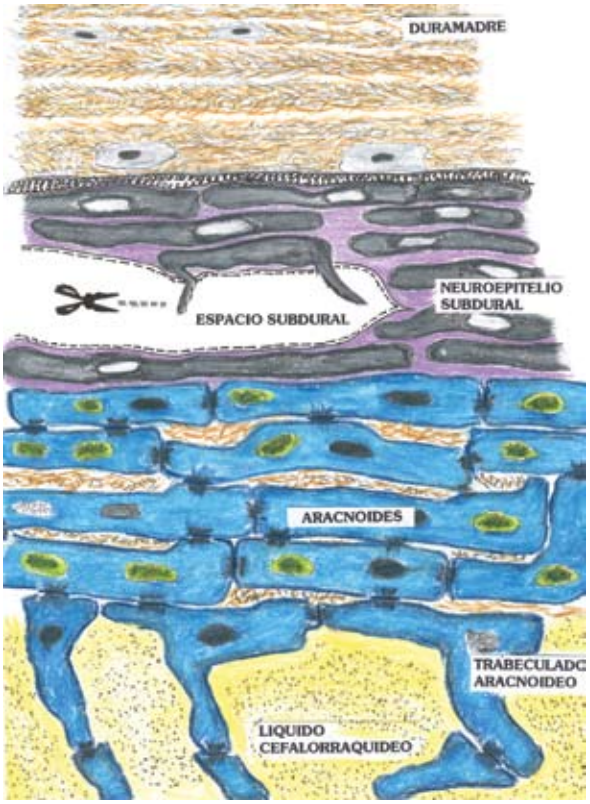

Figura 30. *Esquema del origen del espacio subdural espinal. En el esquema se intenta representar la formación del espacio subdural como un espacio adquirido. La superficie interna y externa de este espacio adquirido quedará revestida por células neuroteliales, algunas de éstas con el citoplasma fragmentado.*

Vasos del saco dural

El sistema arterial en el saco dural está menos desarrollado que en la duramadre craneal. En la región dorsal, los vasos tienen su origen en las ramas espinales de las arterias vertebrales, en las ramas dorso espinales de las arterias intercostales, y en la región lumbar y sacra tienen su origen en las arterias lumbares y sacras. En el espesor de la duramadre se pueden observar vasos con diferentes tamaños, entre los que se identifican arterias y arteriolas[21] (**FIGURA 31**). Dentro del espesor del compartimiento subdural y la lámina aracnoidea predominan los capilares[21] (**FIGURA 32**). Las venas son pequeñas y drenan en los plexos venosos epidurales. La distribución de los linfáticos es intersticial, similar a la que existe en la duramadre craneal. Se presentan en el espesor del saco dural entre las fibras de colágeno. Estos canales linfáticos se comunican entre sí y comunican zonas del espacio epidural, del compartimiento subdural y del espacio subaracnoideo.

Además de los vasos que se pueden observar sobre la superficie del saco dural durante una cirugía (**FIGURA 20** y **21**), el microscopio electrónico de barrido nos permitió comprobar la existencia de vasos en el espesor del saco dural entre las láminas durales. En la **FIGURA 31** se observan dos vasos, uno de ellos de 15 por 40 micrones y otros de 20 por 60 micrones de diámetro. Los vasos se encuentran aplastados entre las láminas concéntricas del saco dural y formarían una red vascular interna dentro del espesor del saco dural. La distancia entre dos vasos es variable y depende del lugar estudiado. En el compartimiento subdural, ubicado en una posición interna y concéntrica a las láminas durales, también se encuentran vasos de menor diámetro, entre los que se incluyen capilares, arteriolas y vénulas. En la parte superior de la **FIGURA 32** se observa el corte transversal de un capilar ocupado por un eritrocito, y en la parte inferior un vaso de mayor calibre, ambos dentro del compartimiento subdural. Cuando se origina el espacio subdural espinal, la rotura de las células neuroteliales del compartimiento subdural puede propiciar el corte de los vasos. Si éstos no se rompen, el nuevo espacio subdural puede presentar una serosidad o acúmulos hídricos (higromas) producto de la lesión celular, y si se rompen, pueden encontrarse hematomas subdurales de diferente tamaño, dependiendo de la naturaleza de los vasos rotos. En la **FIGURA 33** se observa un hematoma subdural desde el interior del saco dural[21], a través de la lámina aracnoidea traslúcida, parcialmente oculto detrás de una raíz nerviosa.

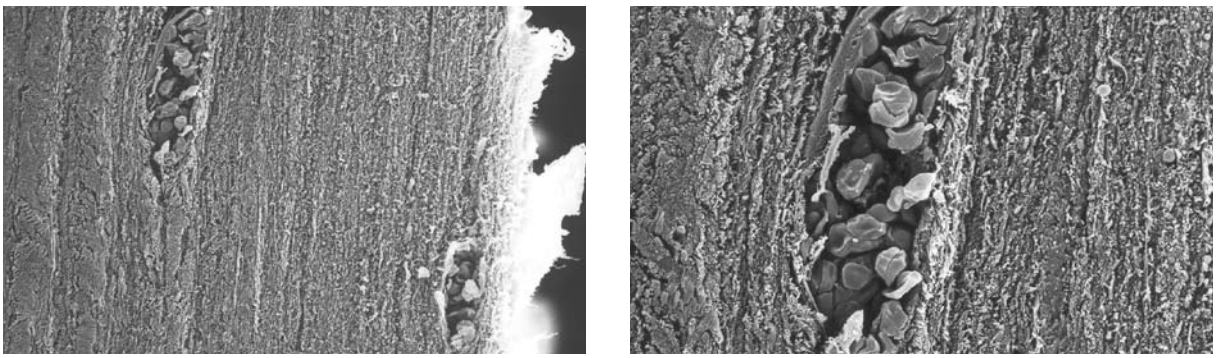

Figura 31. *Saco dural. Vasos encontrados en el espesor del saco dural en un corte sagital. La disposición concéntrica de las láminas durales aplasta a estos vasos. En su interior, varios eritrocitos. Microscopia electrónica de barrido. Aumento: 400x y 1.000x. Con permiso. Publicado en referencia 21.*

Inervación del saco dural

La duramadre está inervada por nervios de naturaleza simpática y sensitiva. Groen[22] estudió, en cuatro fetos humanos, que la duramadre espinal ventral está inervada por un plexo nervioso denso que tiene una distribución longitudinal. Este plexo recibe contribuciones de los nervios sino-vertebrales, del plexo nervioso del ligamento longitudinal posterior y del plexo nervioso que rodea a las ramas de las arterias radiculares. La inervación en la duramadre dorsal es mucho menor y no se han encontrado evidencias de que sus ramas formen un plexo. En los humanos, los nervios de la duramadre ventral pueden dar ramas a cuatro segmentos metaméricos por encima y por debajo de su punto de entrada, con un gran entrecruzamiento entre sus ramas nerviosas vecinas. La presencia de sustancia "P" inmuno-reactiva en la duramadre espinal sugiere que puede haber nervios sensitivos involucrados en la transmisión del dolor [23].

Propiedades del saco dural

Las fibras, en particular las elásticas, aportan propiedades viscoelásticas al saco dural. El mayor estiramiento permite una compresión radial sobre su circunferencia y facilita la acomodación de los cambios dinámicos de volumen de LCR. Una maniobra de Valsalva producirá una disminución brusca del contenido líquido del saco dural, con un desplazamiento del LCR hacia las cisternas subaracnoideas encefálicas y hacia los ventrículos. Estos cambios bruscos se acompañan de modificaciones instantáneas en el diámetro del saco dural.

Los cambios de flexión y extensión del cuello también pueden producir un aumento de la presión del LCR asociado a un movimiento rostral del saco dural sobre el conducto vertebral. Con imágenes de tomografía computarizada se pudo determinar que en flexión hay un aumento del área del saco dural, mientras que en extensión se produce una disminución[24]. El límite de resistencia a la tracción y la rigidez son mayores en sentido longitudinal que en sentido transversal[25,26]. La capacidad de relajación que presenta este tejido demuestra sus propiedades viscoelásticas[25]. La fuerza requerida para distender y romper la duramadre posterior fue de 3,5 a 6,7 veces mayor en sentido longitudinal que en sentido transversal[27].

Con respecto a la permeabilidad del saco dural, la duramadre es una estructura totalmente permeable, que aporta resistencia mecánica, y la lámina aracnoidea es una estructura semipermeable, que actúa como barrera a la libre difusión de moléculas con limitada resistencia mecánica. La lámina aracnoidea puede presentar un 90% de la resistencia al libre paso de moléculas, propiedad que responde a los múltiples planos superpuestos de células aracnoideas y a las fuertes uniones intercelulares. Existe, en gran parte, un pasaje transcelular de las moléculas lipofílicas a tra-

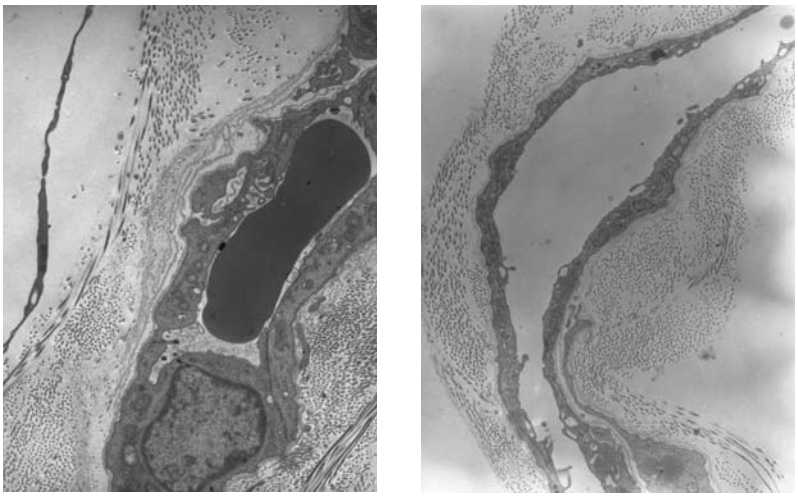

Figura 32. *Saco dural. Vasos de pequeño calibre y capilares en el compartimiento subdural. En la imagen izquierda se observa un capilar con un eritrocito en su interior; alrededor, fibras de colágeno y una célula neurotelial. En la imagen derecha, una vénula rodeada por un pericito. Por fuera del vaso se encuentran fibras de colágeno. Microscopia electrónica de transmisión. Aumento 7.000x. Con permiso. Publicado en referencia 21.*

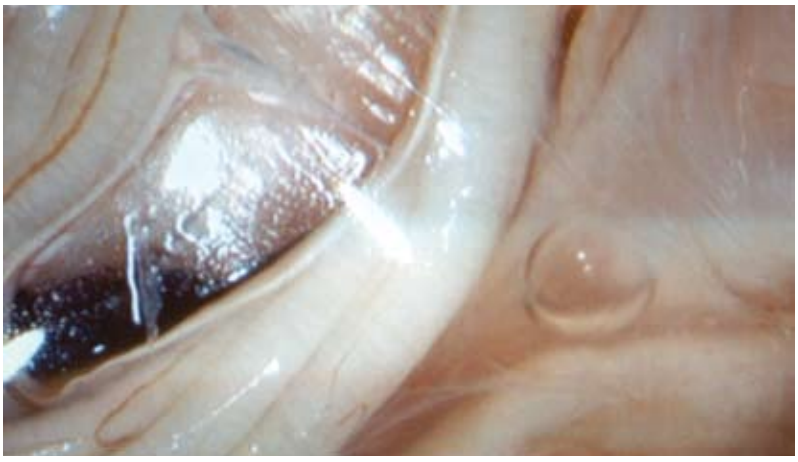

Figura 33. *Hematoma subdural espinal. El hematoma está separado de las raíces nerviosas por una delicada lámina traslúcida, la lámina aracnoidea. Una raíz nerviosa ubicada dentro del espacio subaracnoideo se interpone parcialmente por delante del hematoma. Con permiso. Publicado en referencia 21.*

vés de las membranas celulares de naturaleza lipídica, y en menor proporción, un pasaje de sustancias hidrofílicas a través de los espacios intercelulares (**FIGURA 23**). Esta barrera, desde un punto vista fisiológico, impermeabiliza al saco dural y restringe la pérdida de agua y de solutos del LCR. Contribuye a mantener un volumen dentro del saco dural, en un equilibrio gobernado por los procesos de producción y reabsorción de LCR. Las características histológicas de la aracnoides y de la duramadre podrían explicar por qué las moléculas de solubilidad intermedia en lípidos son más permeables que otras moléculas más liposolubles o más hidrosolubles[28-30].

La permeabilidad meníngea a sustancias lipofílicas puede determinarse con relación al coeficiente de distribución octanol-buffer[31,32]. Esto permite comprobar que sustancias muy hidrofílicas (con un coeficiente de distribución octanol:buffer igual a 1, como la morfina), casi no tienen diferencias de permeabilidad a través del saco dural con respecto a sustancias lipofílicas con valores de 1737 como el sufentanilo; mientras que sustancias con valores intermedios –como el alfentanilo, la bupivacaína y la lidocaína, con coeficiente de distribución octanol:buffer de 129, 560 y 110 respectivamente– tienen valores de permeabilidad más altos[31,32].

En resumen, el saco dural, de externo a interno, está formado por la duramadre, el compartimiento subdural y la lámina aracnoidea. La duramadre es una membrana permeable formada principalmente por fibras colágenas y escasas fibras elásticas que están distribuidas en diferentes direcciones y agrupadas en 80 láminas durales concéntricas. El compartimiento subdural está formado principalmente por células neuroteliales y escasos vasos. La rotura concéntrica de este plano celular da origen al espacio subdural, un espacio adquirido. Si la rotura de células neuroteliales incluye también a los vasos que se cruzan por este compartimiento celular, se originan los hematomas subdurales espinales. Las células aracnoideas que forman la lámina aracnoidea gobiernan el paso de sustancias a través del saco dural.

Referencias Bibliográficas

1. Reina MA, López A, Dittmann M, De Andrés JA. Análisis de la superficie externa e interna de la duramadre humana por microscopia electrónica de barrido. Rev Esp Anestesiol Reanim 1996;43:130-4.
2. Reina MA, López A, Dittmann M, De Andrés JA. Análisis estructural del espesor de la duramadre humana por microscopia electrónica de barrido. Rev Esp Anestesiol Reanim 1996;43:135-7.
3. Dittmann M, Reina MA, López A. Neue ergebnisse bei der darstellung der dura mater spinalis mittles rasterelektronenmikroskopie. Anaesthesist 1998;47:409-13.
4. Reina MA, Dittmann M, López A, van Zundert A. New perspectives in the microscopic structure of human dura mater in the dorso lumbar region. Reg Anesth 1997; 22: 161-6.
5. Reina MA, López A, De Andrés JA. Variación del espesor de la duramadre humana. Rev Esp Anestesiol Reanim 1999;46:344-9.
6. Reina MA, López A, De Andrés JA, Villanueva MC, Cortés L. ¿Existe el espacio subdural? Rev Esp Anestesiol Reanim 1998;45:367-76.
7. Reina MA, De León Casasola OA, López A, De Andrés JA, Mora M, Fernández A. The origin of the spinal subdural space. Ultrastructure finding. Anesth Analg 2002;94:991-5.
8. Reina MA, De León Casasola O, Villanueva MC, López A, Maches F, De Andrés JA. Ultrastructural findings in human spinal pia mater in relation to subarachnoid anesthesia. Anesth Analg 2004; 98: 1479-85.
9. Sadler TW. Sistema nervioso central. En: Sadler TW, Ed. Langman Embriología Médica. 9ª Ed. Buenos Aires: Editorial Panamericana; 2004. p. 463-78.
10. Morisot P. Anestesia y Analgesia Peridurales. Barcelona: Salvat; 1979. p.9-18.
11. Luyendijk W. The plica mediana dorsalis of the dura mater and its relation to lumbar peridurography. Neuroradiology 1976;11:147-9.
12. Blomberg R. The dorsomedian connective tissue band in the lumbar epidural space of humans: an anatomical study using epiduroscopy in autopsy cases. Anesth Analg 1986;65:747-52.
13. Savolaine ER, Pandya JB, Geenblatt SH, Conover SR. Anatomy of the human lumbar epidural space: New insights using CT-epidurography. Anesthesiology 1988;68:217-20.
14. Blomberg R, Olsson SS. The lumbar epidural space patients examined with epiduroscopy. Anesth Analg 1989;68:157-60.
15. Hogan QH. Lumbar epidural anatomy. A new look by cryomicrotome section. Anesthesiology 1991;75:767-75.
16. Hogan Q. Epidural anatomy examined by cryomicrotome section. Influence of age, vertebral level, and disease. Reg Anesth 1996;21:395-406.
17. Reina MA, López A, Valente G, De Andrés JA. Espaço epidural e ligamentos meningo vertebrais. CAR revista (Lisboa) 1998; 15: 7-12.
18. Reina MA, López A, Machés F, Oscar De León Casasola, De Andrés JA. Electrón microcopy and the expansion of regional anesthesia knowledge. Tech Reg Anesth Pain Management (New York) 2002; 6: 165-71.
19. Reina MA, De Andrés JA, López A. Subarachnoid and epidural anesthesia. En Raj P, Ed. Textbook of Regional Anesthesia. Philadelphia: Churchill Livingston; 2002. p. 307-24.
20. Reina MA, De Andrés J, Machés F, López García A. Anatomy of epidural space. New insights. En: van Zundert A, Ed. Highlights in Pain, Theraphy and Regional Anaesthesia. XV. Barcelona: Permanyer Publications; 2006. p. 209-23.
21. Reina MA, López A, Maches F, De Andrés. Origen de los hematomas subdurales espinales. Rev Esp Anestesiol Reanim 2004;51:240-6.

22. Groen GJ, Baljet B, Drukker J. The innervation of spinal dura mater: anatomy and clinical implications. Acta Neurochir 1988;92:39-46.
23. Edvinsson L, Rosendal-Helgesen S, Uddman R. Localization, concentration, and release in cerebral arteries, choroids plexus and dura mater. Cell Tissue Res 1983;234:1-7.
24. Lian P, Sun R, Yang W. Dynamic changes in dimensions of cross-sectional areas of lumbar canal and dural sac: an experimental study. Zhonghua Wai Ke Za Zhi 1995;33:151-4.
25. Patin DJ, Eckstein EC, Harum K, Pallares VS. Anatomic and biomechanical properties of human lumbar dura mater. Anesth Analg 1993;76:535-40.
26. Runza M, Pietrabissa R, Mantero S, Albani A, Quaglini V, Contro R. Lumbar dura mater biomechanics: experimental characterization and scanning electrón microscopy observations. Anesth Analg 1999;88:1317-21.
27. Zarzur E. Mechanical properties of human lumbar dura mater. Arq Neuropsiquiatr 1996;54:455-60.
28. Bernards CM, Hill HF. Physical and chemical properties of drug molecules governing their diffusion through the spinal meninges. Anesthesiology 1992;77:750-6.
29. Bernards CM, Hill HF. Morphine and alfentanyl permeability through the spinal dura, arachnoid and pia mater of dog and monkeys. Anesthesiology 1990;73:1214-9.
30. Bernards CM, Ulma G, Kopacz DJ. The meningeal permeability of R- and S-bupivacaine are no different. Anesthesiology 2000;93:896-7.
31. Strichartz GR, Sánchez V, Arthur GR, Chafetz R, Martín D. Fundamental properties of local anesthetics: II. Meansured octanol: buffer partition coefficients and pKa values of clinically used drugs. Anesth Analg 1990;71:158-70.
32. Mather LE. Clinical pharmacokinetics of fentanyl and newer derivatives. Clin Pharmacokinet 1983;8:422-6.

Aceptado: 19/07/07
En la versión online se publicarán las figuras en color.

Dirección postal: c/Valmjado, 95 1º B, CP 28047, Madrid, España.
E-mail: miguelangel@perticone.e.telefonica.net