

CAPÍTULO PRIMERO

LESIONES DEL PLEXO BRAQUIAL. GENERALIDADES

*Antonio García López, Antonio Saiz Ayala,
Cristina Franco Carcerero, Yolanda Gonzalez Barredo y
Luís López-Durán Stern*

EPIDEMIOLOGÍA

Las lesiones traumáticas del plexo braquial son las peores de todos los nervios periféricos. Estas lesiones, generalmente, se producen después de un traumatismo muy violento como accidentes de tráfico, accidentes laborales, heridas por arma blanca o de fuego. En España está muy extendido el uso de la motocicleta y por lo tanto los accidentes con este vehículo son la causa principal. Aunque el uso del casco también se ha extendido más desde su obligatoriedad, parece que no tiene un papel decisivo en la prevención de estas lesiones en concreto. León hizo un estudio sobre los accidentados de moto que acudían a nuestro servicio de urgencias y observó que la edad media era de 23,5 años y la mayoría de los pacientes era varón y conducía una moto de baja cilindrada. Las lesiones del miembro superior aparecían en un 20% de los pacientes que acudían a la urgencia y había una incidencia del 2‰ de lesiones del plexo braquial²³. Rosson, en un estudio de 102 pacientes con lesión del plexo braquial tras un accidente de motocicleta en Inglaterra, observó que la edad media era de 21 años, que la mayoría eran varones, la cilindrada del motor era inferior a 125 cc y con más frecuencia quedaba afectada la mano dominante³⁶. En un estudio epidemiológico de Midha (1997), las lesiones del plexo braquial aparecen en el 4,2% de los accidentes de motocicleta y afectan al 1,2% de los politraumatizados²⁶. Según Narakas (1985) el 70% de las lesiones del plexo braquial traumáticas se producen por accidentes de tráfico y el 70% de éstas se deben a accidentes de motocicleta o ciclomotor³¹. En España se estima una cantidad de entre 160 y 320 lesionados de plexo braquial en adultos¹². La incidencia de parálisis braquial obstétrica oscila entre el 1 y el 2 por cada mil nacidos en los países industrializados^{5,10,16,39}. En nuestro hospital tenemos una incidencia del 1,1‰. En España, según datos del Instituto Nacional de Estadística, la tasa de natalidad actual es de 400.000 niños por año, lo que nos lleva a estimar una frecuencia aproximada de 450 parálisis obstétricas al año.

En el adulto, lógicamente se suelen asociar a lesiones viscerales abdominales, torácicas o craneales, así como a otros traumatismos del aparato locomotor. Puede existir ruptura de la arteria subclavia que sucede en el 15% de las supraclaviculares y en un

Antonio García López *et al.*

30% de las infraclaviculares⁴. Daño de la médula espinal se observa en el 5% de las lesiones completas².

Revisando la literatura que existe sobre el tratamiento de estas lesiones se puede comprobar como éstas han pasado por una larga historia de esfuerzos de reparación quirúrgica con fases de optimismo y pesimismo. Inicialmente se consideró la cirugía inútil, por sus escasos resultados. Posteriormente, se recomendó, en las lesiones completas, una amputación por encima del codo y el uso de una prótesis. En la actualidad las técnicas microquirúrgicas, los pegamentos biológicos y las técnicas de diagnóstico intraoperatorias han mejorado notablemente los resultados quirúrgicos en fases tempranas e incluso se están practicando reimplantaciones radiculares exitosas en arranamientos medulares⁶. Para conseguir el mejor beneficio, la cirugía debe ser lo más precoz posible y, para ello, se debe establecer un pronóstico exacto temprano. En la valoración diagnóstica de estos pacientes el examen clínico y las pruebas complementarias son esenciales y cada vez nos aproximan más al pronóstico¹³.

PLEXO BRAQUIAL. RECUERDO ANATÓMICO

Las raíces nerviosas, nada más emerger del foramen vertebral, se dividen en una gran rama anterior, que va a formar el plexo braquial, y una corta y delgada rama primaria posterior, la cual inerva la musculatura profunda del cuello y la piel de la parte posterior del cuello. Del ramo anterior se originan el nervio frénico (raíces C3, C4 y C5), el nervio escapulodorsal para el músculo romboides (raíz C5) y el nervio torácico largo que inerva el serrato anterior (raíces C5, C6 y C7).

El plexo braquial se forma con los ramos anteriores de las raíces C5, C6, C7, C8 y T1. La raíz C5 se anastomosa con la C6 para formar el **tronco superior**. La raíz C7 queda independiente constituyendo el **tronco medio**. Las raíces C8 y D1 se fusionan para formar el **tronco inferior** (Figura 1).

Al nivel de la clavícula, cada tronco se divide en dos ramas, una anterior y otra posterior que luego se unen entre sí. La unión de las tres divisiones posteriores forma el **cordón posterior** o radiocircunflejo. La unión de las divisiones anteriores del tronco superior y el medio constituye el **cordón lateral**. La división anterior del tronco inferior forma el **cordón medial**. Esta descripción tiene utilidad teórica debido a que existen muchas variaciones de este modelo y, a menudo, el cordón posterior nunca se forma. También existen numerosas variaciones en la situación del plexo en relación con los agujeros de conjunción (plexo prefijado C4-C5-C6-C7-C8, y postfijados C6-C7-C8-T1-T2) y en la distribución de las anastomosis, lo que explica ciertas paradojas clínicas o mielográficas.

Los cordones tienen ramas terminales pero existen ramas más proximales que son esenciales en la exploración porque nos van a orientar sobre el nivel de la lesión y la extensión. En las lesiones radiculares podrá existir parálisis del nervio escapulodorsal (C5), del nervio frénico (C3, C4 y C5), del nervio torácico largo (C5, C6 y C7) y de los ramos pos-

teriores que realizan inervación segmentaria de la musculatura cervical profunda paravertebral. En las raíces C8 y T1 no existen raíces, pero una avulsión en este nivel producirá síndrome de Horner. En las lesiones tronculares se podrá ver afectado el nervio supraescapular, que se origina del tronco superior. No existen más ramas en los troncos ni las divisiones. El cordón posterior termina en el nervio radial y el nervio circunflejo, originando dos ramas importantes

que hay que explorar, que son el nervio toracodorsal, que inerva el dorsal ancho, y el nervio subescapular para el redondo mayor. El cordón lateral da el nervio pectoral lateral y su lesión producirá atrofia de las fibras claviculares del pectoral mayor. El cordón lateral termina en el nervio musculocutáneo y en la raíz externa del nervio mediano que, fundamentalmente, lleva las fibras sensitivas. Por lo tanto, una lesión aislada del cordón lateral producirá una pérdida de la flexión del codo y de la sensibilidad del nervio mediano con función de la musculatura tenar normal. En el cordón medial contribuye a formar el nervio mediano con su rama motora tenar y origina el nervio cubital: su afectación producirá una parálisis mediano-cubital con sensibilidad conservada en el área del mediano.

El plexo adopta forma triangular, con la base en la columna y el vértice en la axila, siendo el lado superior más largo y vertical que el inferior. En la región supraclavicular, los troncos nerviosos transcurren entre los músculos escaleno anterior y escaleno medio; y en la región infraclavicular, acompañando al paquete vascular subclavio, entre el músculo subescapular y pectoral menor.

Los tejidos que soportan las raíces superiores (C5, C6 y C7) al foramen vertebral son mucho más fuertes que en las raíces inferiores, lo que las hace mucho menos vulnerables a la tracción. Por lo tanto, las raíces C8 y T1 sufren avulsiones con más frecuencia mientras que las raíces superiores, generalmente, sufren rupturas o estiramientos después de la salida del agujero vertebral.

TIPOS ANATOMOPATOLÓGICOS

AVULSIÓN RADICULAR O LESIÓN PREGANGLIONAR

Se trata de un arrancamiento de las raíces de la médula con la consiguiente muerte de las neuronas medulares correspondientes. Antes de salir por el agujero de conjunción,

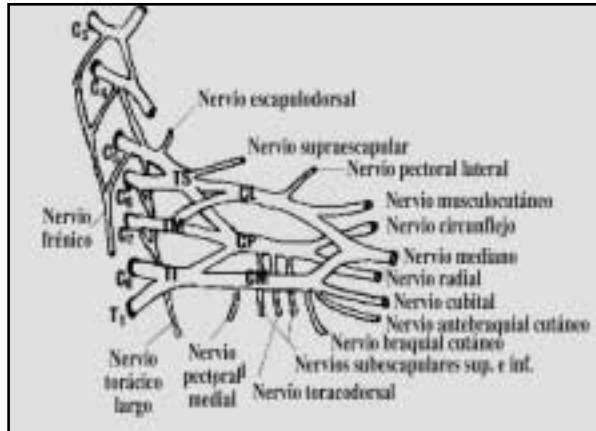


Figura 1. Esquemización del plexo braquial.

Antonio García López *et al.*

las raíces del plexo braquial están formadas por ramas ventrales y dorsales que se unen a la médula espinal en los surcos anterolaterales y posterolaterales, respectivamente. En la unión de las raíces con la médula espinal se identifica la zona de transición. La zona de transición es relevante en relación con el nivel de lesiones intradurales. Se tenía asumido que las lesiones preganglionares eran avulsiones medulares, pero actualmente se reconocen 2 tipos de lesiones intradurales: las rupturas intradurales y las verdaderas avulsiones, siendo las primeras más comunes (Figura 2). Además, las avulsiones pueden estar confinadas a las raíces primarias dorsales o a las ventrales. La neurona sensitiva situada en el ganglio sensitivo raquídeo de la raíz dorsal sobrevive, así como el axón sensitivo periférico.

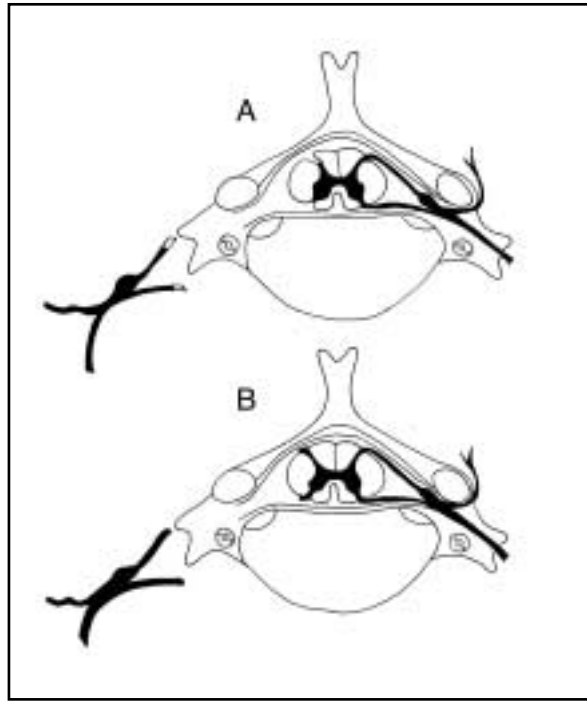


Figura 2. Esquematización de la formación del nervio raquídeo y tipos de lesión preganglionar: A) lesión central o verdadera avulsión, B) avulsión distal a la zona de transición.

A veces, la laceración medular origina signos de piramidalismo, o trastornos esfinterianos, y se observa un síndrome de Brown-Sequard, de diferente severidad, en el 5% de las avulsiones completas, que se especula que es producido por compromiso vascular medular. La ruptura de la duramadre produce fuga del LCR y la cicatriz dural puede formar o no pseudomeningoceles.

Es una lesión gravísima e irreparable por cirugía directa y no existe ninguna posibilidad de recuperación espontánea.

LESIÓN POSTGANGLIONAR

Después del ganglio raquídeo. Pueden ser lesiones en continuidad con conservación más o menos del epineuro (axonotmesis grave de Seddon) o se pueden presentar como rupturas completas con formación de doble neuroma (neurotmesis) (Tabla 1)³⁸. Las raíces C5 y C6, generalmente, se rompen fuera del foramen, mientras que las raíces C8 y T1 se arrancan de la médula.

Tabla 1. Clasificación de Seddon

- 1. Neurapraxia.** Bloqueo conducción con continuidad axonal. Persiste excitabilidad de estructuras distales, por desmielinización (tras compresión). Buen pronóstico en semanas-meses.
- 2. Axonotmesis.** Pérdida de continuidad axonal a la altura de la lesión con integridad de tubos endoneurales. Existe degeneración walleriana. La recuperación depende de la regeneración de nuevos axones, hasta su diana, por los tubos que sirven de guía.
- 3. Neurotmesis.** Pérdida total de continuidad de las estructuras nerviosas (perineuro, endoneuro y epineuro). La regeneración espontánea no es posible y necesita de una reparación quirúrgica.

TIPOS DE LESIÓN SEGÚN LOCALIZACIÓN

SUPRACLAVICULARES

Constituyen el 75% de todos los plexos. Pueden ser preganglionares en raíces o postganglionares al nivel de los troncos. Dentro de ellas, se distinguen varios tipos:

Superiores (Erb Duchenne). Son el 22% de las supraclaviculares. Se producen por tracción del brazo hacia abajo y desviación de la cabeza hacia el otro lado con aumento del ángulo cuello-hombro. Implican las raíces C5, C6 solas o junto con la C7 o el tronco superior solo o junto con el tronco medio.

Medias (Remack). Son muy raras. Se producen por tracción con el brazo en abducción de 90° y afectan la raíz C7 o el tronco medio, exclusivamente.

Inferiores (Déjerine Klumpke). El 3% de las supraclaviculares. Se producen por tracción hacia arriba del brazo que origina, casi siempre, un arrancamiento de las raíces C8 y T1.

Totales. Son las más frecuentes, observándose en el 75% de las supraclaviculares. Se producen después de un traumatismo más violento, o bien se observa ruptura postganglionar de todo el plexo, ruptura de las raíces superiores y avulsión de las inferiores o avulsión de todas las raíces.

RETROCLAVICULARES

Postganglionares, muy infrecuentes y afectan a las divisiones. Se observan en fracturas de clavícula.

Antonio García López *et al.*

INFRACLAVICULARES

Constituyen el 25% de todos los plexos. Lógicamente son postganglionares y ocurren en los cordones y sus ramificaciones. Son de mejor pronóstico. En estos casos, la tracción nerviosa se produce por luxaciones de hombro, o de la articulación acromioclavicular, y en fracturas de la extremidad proximal de húmero. Suceden, generalmente, donde los nervios están más fijos, como el paso del nervio circunflejo en el espacio cuadrilátero de Velpeau, la introducción del nervio supraescapular por la escotadura supraescapular o la entrada del nervio musculocutáneo en el coracobíceps. Tienen una alta incidencia de lesión vascular asociada.

DOBLE NIVEL

Suceden en un 10% de las supraclaviculares. A una lesión supraclavicular se le asocia una afectación infraclavicular. Lo más frecuente es la asociación de una lesión radicular o de un tronco primario con un arrancamiento, al nivel muscular, del circunflejo en el deltoides o del musculocutáneo a su entrada en el coracobíceps.

EVALUACIÓN CLÍNICA DEL PACIENTE

Existen tres puntos primordiales a la hora de examinar un paciente con una lesión del plexo. En primer lugar se debe determinar la **extensión** de la lesión con el número de raíces afectadas. El candidato típico para realizar una reconstrucción microquirúrgica es el que tiene una parálisis total unilateral, o casi total. El examen físico puede identificar con razonable exactitud las fibras nerviosas lesionadas conociendo los grupos musculares afectados y las áreas de alteración sensitiva. Sin embargo, la interpretación del examen físico puede ser difícil. En segundo lugar es crucial la **localización** del nivel de la lesión, tanto para saber el pronóstico funcional como para establecer un criterio quirúrgico. Debemos saber, por tanto, si las lesiones son preganglionares o postganglionares y, estas últimas, es útil situarlas al nivel supraclavicular o infraclavicular. El examen clínico, a veces, es insuficiente para establecer este punto y puede ser necesario realizar pruebas complementarias o incluso la exploración quirúrgica. Por último, es determinante conocer la **severidad** de la lesión neurológica, desde una neurapraxia transitoria a una ruptura o arrancamiento nervioso irrecuperable³⁸. Para este último punto la evolución clínica es determinante, especialmente en lesiones parciales, a la hora de decidir si un paciente precisa de una reconstrucción temprana o de un período de mayor observación.

SIGNOS FÍSICOS ESPECIALES

El **signo de Tinel** proporciona una guía de la existencia de brotes de crecimiento axonal sensitivo y su avance por el nervio. Consiste en la producción de una parestesia

sia cuando se golpea la piel sobre el recorrido del nervio, recuperándose. Por lo tanto, el estudio del avance por el nervio del signo de Tinel nos informa del proceso de regeneración nerviosa sensitiva. Según Landi (1979) es de gran ayuda en la evaluación y seguimiento de las lesiones del plexo braquial por las siguientes razones²¹:

- Su falta de presencia indica lesión preganglionar de la raíz evaluada.
- Dolor local implica una lesión del plexo cervical recuperándose o hay medio de contraste residual en un pseudomeningocele.
- Un signo de Tinel puro indica que existe continuidad anatómica y su seguimiento secuencial indica progresión de la recuperación espontánea o, después, de reparación quirúrgica. Las raíces C5 C6 y C7 son las más superficiales y, por lo tanto, más fáciles de explorar.
- El signo de neuroma es positivo cuando se observa dolor en el territorio sensitivo del nervio golpeado. Este signo indica la ruptura completa de la continuidad de todo el nervio.

Un indicador importante de la severidad de la lesión es el **signo Horner**, en el ojo del mismo lado de la lesión, que consiste en enoftalmos, ptosis parcial, miosis con constricción pupilar normal, en respuesta a la luz, y anhidrosis. Éste suele presentarse inmediatamente, aunque ocasionalmente aparece a los 3-4 días del traumatismo. Se produce por lesión del núcleo cilioespinal de Budge, localizado en la medula al nivel de la raíz T1. El signo de Horner persistente indica lesión severa de la raíz T1 y se relaciona fuertemente con una avulsión de esta raíz.

Otro signo importante es la presencia de **dolor severo** en una extremidad insensible. Indica desaferenciación del miembro y aparece en las avulsiones radiculares, por lo que es un signo de mal pronóstico.

A veces, el paciente se presenta con una desviación de la cabeza o escoliosis cervical sobre el hombro contralateral, a largo plazo, en el seguimiento del paciente. Es el **signo de la bailarina balinesa**, y se produce por una denervación de los músculos paraespinales y escapulares del lado lesionado. Es de mal pronóstico y aparece también en lesiones preganglionares. El músculo trapecio inervado por el nervio accesorio del espinal y el plexo cervical a menudo se observa débil o paralizado durante los primeros 3 meses en las lesiones por tracción del plexo braquial. El trapecio sigue una evolución de recuperación gradual.

La **parálisis** del músculo serrato anterior, que se observa en forma de aleteo de la escápula (Figura 3), del hemidiafragma homolateral (Figura 4), del romboides o de los escalenos también indican lesión preganglionar y, por lo tanto, es de mal pronóstico.

El **test del reflejo de histamina** también puede orientar sobre si una lesión es preganglionar o postganglionar. Tras la administración subcutánea de histamina, si se

Antonio García López *et al.*

observa triple respuesta, indica integridad de fibras aferentes y, por lo tanto, lesión preganglionar. Está en desuso porque sus resultados son de difícil interpretación y por el riesgo de reacciones anafilácticas.

PRUEBAS DE IMAGEN

La **evaluación radiológica** de las lesiones del plexo es uno de los grandes retos para los neurorradiólogos. Inicialmente, los métodos de imagen permitían sólo una aproximación a la existencia, o no, de avulsión radicular. Actualmente, con la mejora en la resolución espacial de la tomografía computerizada (TC) y la resonancia magnética (RM), se trata de diferenciar entre las roturas intradurales centrales (que incluyen una pequeña porción del cordón medular de donde procede) o periféricas (que muestran un muñón de diferente longitud dentro del saco). Además de la evaluación del nivel y la extensión de la lesión, los métodos de imagen permiten planificar la elección los nervios “donantes” (nervio espinal accesorio, nervio intercostal, frénico etc.) para el trasplante y/o neurotización durante la cirugía del plexo braquial^{32,37}.



Figura 3. Parálisis del músculo serrato anterior donde se hace evidente un aleteo de la escápula.



Figura 4. Parálisis diafragmática en bebé con parálisis braquial obstétrica derecha.

Las **técnicas de imagen** de mayor certeza, a la hora de establecer el nivel de la lesión, son la mielografía clásica, la TC-mielografía y la RM. La fiabilidad de este último método es cada vez más alta, aunque no es concluyente en todos los casos, siendo preciso recurrir a procedimientos más “invasivos” que requieren punción lumbar como son la mielografía o la TC-mielografía. A continuación presentaremos las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos de imagen.

RADIOLOGÍA CONVENCIONAL

Es la técnica inicial en muchos pacientes politraumatizados. Sus ventajas más evidentes son su gran disponibilidad y su bajo coste. Permite identificar, de manera urgente, la presencia de fracturas cervicales, costales, de la clavícula o de la cabeza del humero. El aumento del espacio prevertebral puede indicar la presencia de hematoma. Las fracturas sutiles y las luxaciones vertebrales precisan ser analizadas con TC. La radiografía de tórax puede poner de manifiesto la presencia de parálisis frénica (C3-C5) (Figura 4)^{2,24}.

ARTERIOGRAFÍA

Puede ser útil para valoración de las roturas vasculares que pueden acompañar las lesiones del plexo en el adulto. Su utilización es evidente cuando clínicamente existe un déficit vascular para planificar la reparación vascular. Pero la rica vascularización colateral alrededor del hombro puede mantener una buena perfusión distal. En otros casos, pueden existir lesiones silentes como aneurismas que pueden originar una situación de peligro durante la exploración o la reparación quirúrgica. Si se sospechan estas circunstancias debe realizarse esta prueba preoperatoria. Actualmente, el uso de la arteriografía está siendo reemplazado por la RMA. Las lesiones vasculares en el paciente obstétrico son excepcionales.

MIEOGRAFÍA

Es la técnica de neuroimagen más antigua utilizada en la evaluación del plexo braquial (intradural). Fue introducida clínicamente el año 1947 por Murphey y cols. que describieron, por primera vez, un “meningocele traumático” por desgarró de la duramadre como signo de avulsión radicular²⁹. Es un método mínimamente invasivo que precisa la realización de una punción lumbar y la introducción de unos 10-15 ml de contraste intratecal no iónico. Con la introducción de los medios de contraste hidrosolubles, en los años 80, se pudo demostrar con más claridad la avulsión de las raíces como una ausencia del “defecto de repleción normal” debido a la raíz dentro de la vaina o manguito dural. En conjunto, este signo se asocia a lesión preganglionar en el 96,5% de los casos. La presencia de meningocele se asocia en un 99% a lesión preganglionar. Es, en general, un método muy sensible pero poco específico. Los falsos negativos se

Antonio García López *et al.*

deben fundamentalmente a la avulsión aislada del ramo ventral de la raíz y a la falta de óptima opacificación de los meningoceles o de los manguitos, sobre todo a nivel C5-C6. También plantean problemas la formación de cicatrices epidurales en los casos crónicos o la extravasación de contraste, a través del desgarro dural, en los casos recientes⁴⁸. Por estas razones, además de las relativas a la propia punción lumbar, es un método en desuso superado en resolución espacial por la TC-mielografía.

Actualmente, se ha desarrollado una nueva técnica que utiliza la misma tecnología 3D empleada en el diagnóstico de aneurismas intracraneales en los modernos centros de neurorradiología vascular intervencionista denominada **Mielografía Rotacional Tridimensional (3D)**. Los primeros resultados son buenos y podrían competir con la TC-mielografía en el futuro próximo. Se precisa punción directa vía C1-C2 y la introducción de unos 20 ml de contraste intratecal de alta concentración. La necesidad de personal altamente cualificado es la mayor limitación de esta técnica frente a la RM o la TC²⁰.

TC-MIELOGRAFÍA (TCM)

Desde su introducción clínica en 1975 la TC ha sido, y todavía es, la técnica de neuroimagen más ampliamente utilizada en nuestro medio hospitalario. La rapidez, la gran disponibilidad, y el bajo coste comparado con la RM son sus ventajas más importantes. Su capacidad para demostrar pequeñas fracturas es muy superior a la RM. La combinación TC con la introducción de medio de contraste intratecal, mediante punción lumbar, permitió la evaluación de las raíces nerviosas intradurales diferenciando, además, entre raíces ventrales y dorsales convirtiendo al método en el *gold standard* de los métodos de imagen en las lesiones traumáticas del plexo braquial. En 1986, Marshall y De Silva publicaron la primera serie de TCM con resultados muy prometedores, a pesar de las limitaciones técnicas de los primeros equipos de TC²⁵. La avulsión radicular se identifica en TCM como la ausencia de continuidad de la raíz con el cordón medular. Mientras que la fiabilidad de la mielografía para avulsión intradural fue sólo del 37,5%, la combinación con TC la elevó al 75%. En 1996 Walker y cols. publicaron mejores resultados con sensibilidad del 95% y especificidad del 98% para avulsión completa de la raíz⁴⁷. Los meningoceles traumáticos son fácilmente detectados con TCM, sobre todo sus componentes intra-raquídeos que son peor valorados con mielografía (Figura 5). Sólo el 57% se asocian con avulsión completa y ausencia de raíces en su interior. Por otra parte, no es infrecuente la existencia de avulsiones radiculares sin meningocele asociado, es decir, sin alteración de la anatomía del agujero intervertebral. En casos muy raros se puede objetivar extravasación de contraste a las partes blandas (Figura 6).

La TCM es una técnica muy dependiente de **factores técnicos**. Normalmente, la punción lumbar y la introducción de contraste no iónico se realizan en una sala con telemando y fluoroscopia. Tras la punción lumbar con aguja del número 21G y la introducción de 7 ó 10 cc de contraste intratecal hidrosoluble, se coloca al paciente en decúbito prono con hiperextensión del cuello y se levanta la mesa en posición Trendelenburg,

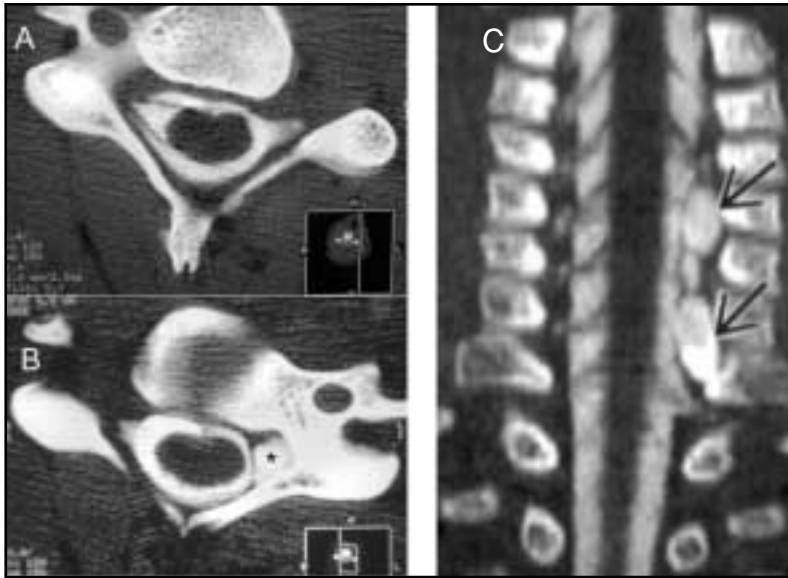


Figura 5. TC-mielografía. Avulsiones múltiples. A) Plano axial a nivel C5-C6 muestra una avulsión completa del ramo anterior y posterior de la raíz C5 del lado izquierdo desde su inserción del cordón medular. B) El un plano inferior se muestra la porción intrarraquídea de un pequeño meningocele asociado a la raíz avulsionada (asterisco). C) MPR. Reconstrucción en el plano coronal muestra múltiples meningoceles intra-raquídeos asociados a avulsiones múltiples.

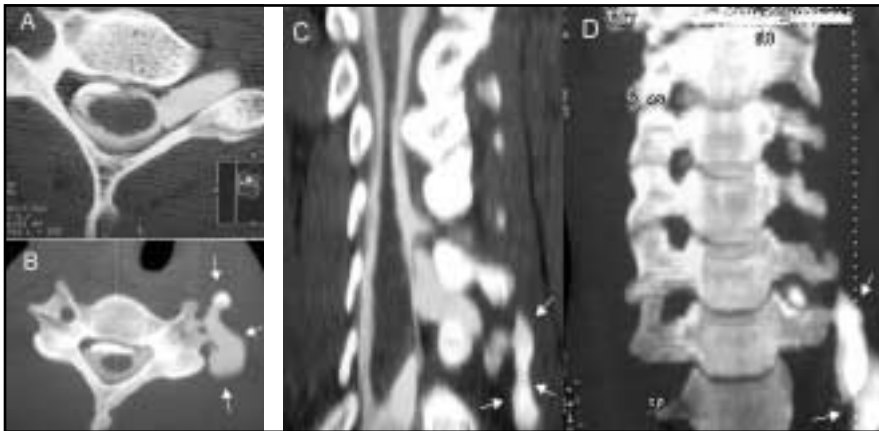


Figura 6. TC-mielografía. Pseudomeningocele traumático. A) Plano axial a nivel C5-C6 muestra una avulsión completa del ramo anterior y posterior de la raíz C5 del lado izquierdo desde su inserción del cordón medular asociado a un meningocele foraminal y extra-foraminal. B) La imagen axial MIP muestra la porción extrarraquídea del extenso pseudomeningocele asociado a la raíz avulsionada (flechas). C) Imagen MPR reconstruida: muestra una sección sagital oblicua. D) Sección subvolumétrica coronal MIP: muestra los mismos hallazgos.

Antonio García López *et al.*

siguiendo con la escopia el descenso de la columna de contraste hasta la región cervical. Posteriormente, se pasa a la sala de TC donde el paciente debe dar dos vueltas completas sobre sí mismo para evitar la formación de “niveles” de contraste con exceso de densidad. Siempre se debe cubrir desde C3 a T2 y son preferibles cortes finos de 1,5–2 mm de espesor, adquiridos con técnica helicoidal. La zona baja del cuello debe explorarse con mayor miliamperaje para evitar los artefactos por fotopenia en el detector. En los lactantes, la punción y sedación se realiza en la propia sala de TC. Posteriormente, en la estación de trabajo se realizarán las reconstrucciones multiplanares que permiten evaluar cada una de las raíces exploradas en múltiples planos.

Los riesgos más importantes de esta técnica son, además de los propios la punción lumbar, la reacción alérgica al contraste intratecal y los efectos neurotóxicos del contraste, aunque éstos son actualmente muy poco frecuentes. En raras ocasiones pueden existir náuseas y cefalea. La formación de fibrosis intradural y la distorsión que producen los meningoceles quísticos son las causas más frecuentes de falsos negativos y positivos⁷.

Las limitaciones más importantes son la falta de sensibilidad para diagnosticar lesiones intramedulares (contusiones,iringomielia, edema, etc.), la avulsión parcial y la evaluación de las raíces bajas (C8 y T1). Esto último es debido, en parte, a los artefactos de “endurecimiento del haz” de rayos secundario a la inclusión de los hombros en el campo de exploración y también, en parte, a la progresiva oblicuidad de las raíces inferiores, lo que aumenta los falsos positivos en esta área.

Con técnicas de alta resolución se puede visualizar, en ocasiones, un pequeño “muñón” residual en continuidad con el cordón medular (rotura periférica) (Figura 7) o bien un pequeño “sacabocado” medular (rotura central). Estos hallazgos pueden ser muy importantes en casos de rotura reciente, en los que se puede intentar la re-implantación quirúrgica intradural. En la literatura, la correlación de la TCM con la inspección intraoperatoria (verdadero *gold standard*) es muy variable y fluctúa entre el 65 y el 85%, según las series y tipo de equipo utilizado⁴¹. La TCM permite, además, detectar fracturas ocultas, subluxaciones, hematomas paraespinales o en los músculos escalenos (Figura 8).

RESONANCIA MAGNÉTICA

La RM es una técnica no invasiva que presenta múltiples ventajas frente a la TCM. Las dos más importantes son la ausencia de radiación ionizante y la no necesidad de realizar punción lumbar e introducción de contraste intratecal. Las contraindicaciones absolutas en RM son la presencia de marcapasos, clips o cuerpos extraños metálicos ferromagnéticos tanto intraoculares, o intracraneales, etc. Una contraindicación relativa es la claustrofobia, que puede ser solventada con la sedación del paciente. Los niños y neonatos también precisan sedación, para evitar artefactos por movimiento.

Las técnicas iniciales, con cortes de 4-5 mm de espesor, limitaban la visualización de las raíces, en el plano axial, que medían sólo 1-3 mm. La pérdida de continuidad de los ramos dorsal o ventral con el cordón medular es el criterio más utilizado para el diag-

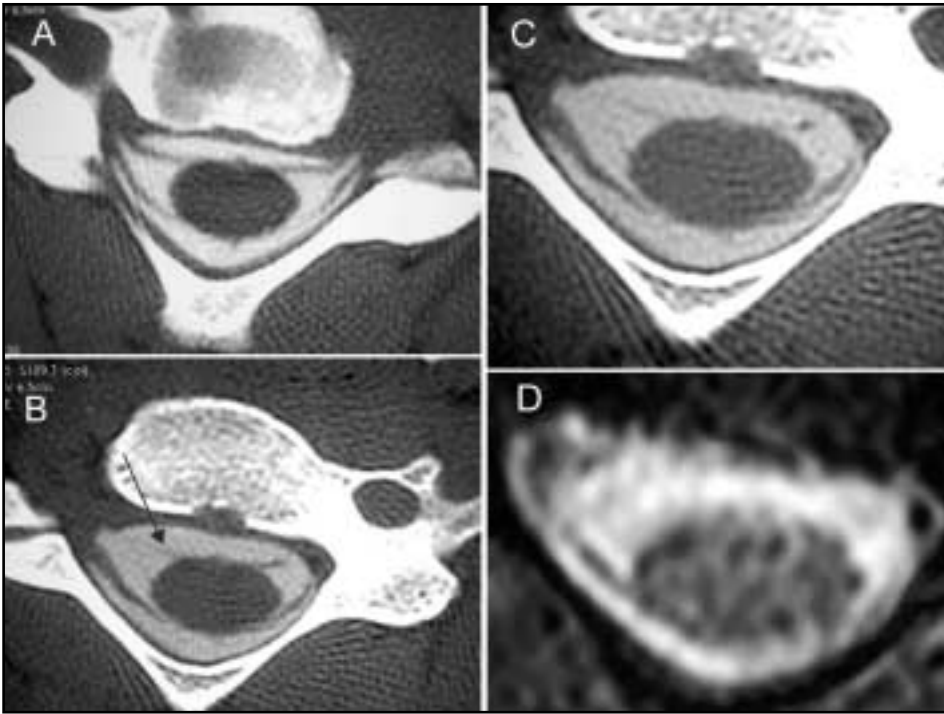


Figura 7. TC-mielografía. Avulsión ramo anterior A) Plano axial a nivel C4-C5 con cortes de espesor de 2 mm muestra el trayecto normal de las raíces o ramos anteriores y posteriores desde el cordón medular hasta el agujero de conjunción. B) El plano inferior muestra la avulsión aislada del ramo anterior derecho con un pequeño muñón o fragmento proximal residual (flecha). C-D) La comparación con la imagen de RM del mismo paciente muestra una menor resolución de contraste y de resolución espacial.

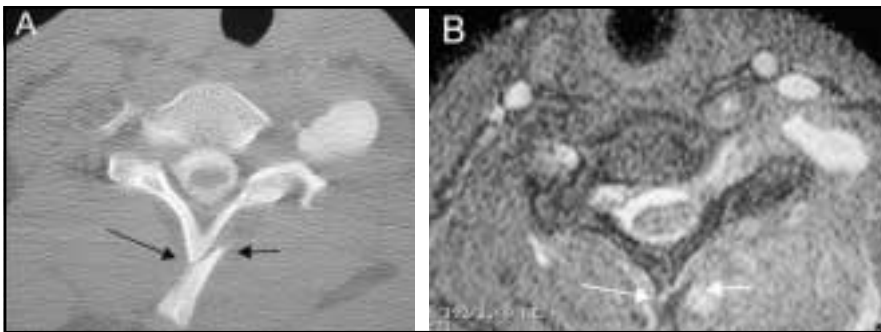


Figura 8. Fractura y meningocele. A) TC-mielografía. Plano axial a nivel C7-T1: muestra una clara fractura de la apófisis espinosa (flechas) asociado a un meningocele foraminal. B) La imagen de RM T2 axial del mismo caso muestra los mismos hallazgos, pero con menos claridad.

Antonio García López *et al.*

nóstico de rotura, al igual que TCM. Así, inicialmente, la fiabilidad diagnóstica era baja, del 73% para C5 y del 64% para C6⁷.

Además, la RM es muy superior a la TCM en la valoración del propio cordón medular y de las partes blandas en general. Hallazgos como edema medular, siringomielia, hematomas o meningoceles traumáticos son fácilmente puestos de manifiesto con las secuencias potenciadas en T2 (Figura 9). Los hallazgos secundarios más frecuentes son edema medular (fase aguda precoz), desplazamiento del cordón medular, siringomielia postraumática, hemorragia o cicatrices en el canal espinal, ausencia de raíces en el canal o foramen, meningocele traumática y denervación de los músculos extensores (edema inicial/degeneración grasa tardía) (Figura 10). En otras series, y considerando todos estos signos, la RM ha demostrado ser muy sensible, pero cuando se consideraron sólo raíces individuales, se alcanzó únicamente el 81% de sensibilidad. Las causas de error diagnóstico más frecuentes son la avulsión parcial, fibrosis intradural, los meningoceles y los propios fallos técnicos. La RM también presenta problemas para determinar el nivel exacto de la avulsión por falta de referencias óseas claras^{7,33,41}.

Con técnicas de **3D RM-mielografía**, con cortes contiguos de 2 mm de espesor, la sensibilidad, especificidad y fiabilidad de la RM para detectar meningocele traumático fue del 88, 100 y 98%, respectivamente, y para avulsión completa fue del 91, 92 y 92%. En la serie de Gasparotti estas cifras fueron similares: 89, 95 y 92%, respectivamente, pero utilizó la TCM como *gold standard*¹⁴. Con estas técnicas de “alta resolución”, que combinan supresión de la grasa y un efecto mielográfico, se pueden objetivar la separación o atenuación de los ramos radiculares dentro o distales al saco diverticular. También es posi-

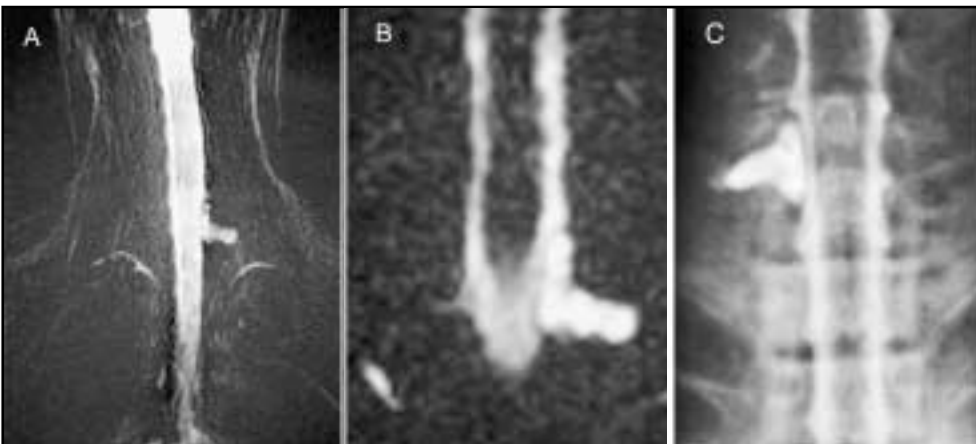


Figura 9. RM-mielografía vs mielografía. A) Secuencia rápida de alta potenciación en T2 (SS-*single shot*) de A. “corte grueso” y B) de “corte fino” en el que se observa un meningocele traumático con componente intra y extra-raquídeo. Este tipo de secuencias de efecto mielográfico no permite evaluar las raíces pero es útil a la hora de detectar meningoceles. C) La mielografía convencional permite detectar meningoceles y avulsiones, aunque son frecuentes los falsos negativos.

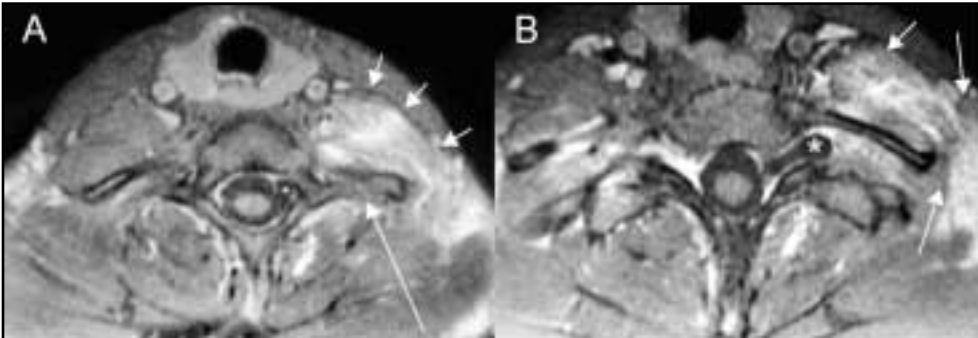


Figura 10. RM-mielografía. Afectación muscular. A y B) El plano axial de RM potenciada en T1 y contraste a nivel C7-T1. Existe una afectación de los músculos escalenos y paraespinales (flechas cortas) por hematoma y/o denervación. Además existe una fractura de la apófisis transversa (flecha larga) y un meningocele traumático (*) con avulsión de la raíz C8.

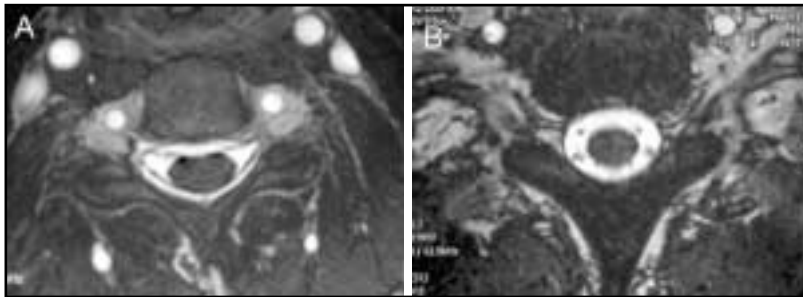


Figura 11. RM-mielografía. Estudio normal. A) El plano axial C4-C5 y B) el plano axial C6-C7 del mismo caso muestran, con nitidez, el trayecto de las raíces cervicales (ramo anterior y posterior) sin necesidad de contraste. El trayecto de las raíces inferiores es más oblicuo y su apariencia es más puntiforme y menos lineal en el plano axial.

ble identificar hinchazón o retracción de la porción distal de las raíces o “bolas” o “muñones” de retracción de las raíces proximales (neuomas). Los modernos equipos permiten realizar secuencias de alta resolución con cortes finos de 1,5 mm cada 0,8 mm, con FOV de 210 y matrices de 288 x 256 en tiempos relativamente cortos (3,5 minutos) (Figuras 11 y 12). La manipulación de los datos 3D en la estación de trabajo con técnicas MIP (*multiple intensity projection*) permite reproducir múltiples proyecciones oblicuas similares a las de la mielografía convencional (Figura 13)³⁰. La denervación de los músculos paraespinales posteriores es de mal pronóstico y sugiere una lesión preganglionar. Puede existir hiperintensidad de estos músculos a partir de los 15 días del trauma^{43,44}. Se ha estudiado la utilidad del contraste (gadolinio) para la evaluación de las raíces avulsionadas. Se ha demostrado un realce del muñón radicular y de la zona de entrada en la médula obteniéndose una sensibilidad y una especificidad del 47 y del 98%, respectivamente¹⁷.

Antonio García López *et al.*

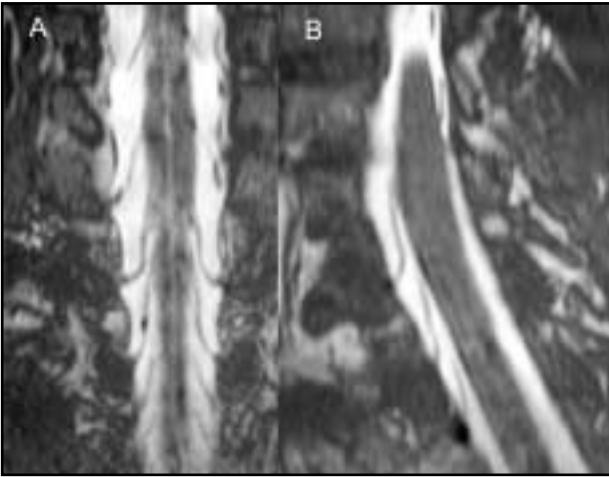


Figura 12. RM-mielografía. Estudio normal. Imágenes reconstruidas (MPR). A) El plano coronal y B) el plano sagital oblicuo del mismo caso anterior muestran, con nitidez, el trayecto de las raíces cervicales sin necesidad de contraste. La adquisición 3D permite postprocesar las imágenes y obtener cualquier plano del espacio.

Las secuencias más habituales para explorar la porción extraganglionar del plexo son: coronal T1 y STIR, sagital oblicuo T1 y STIR. Los signos de lesión postganglionar son hinchazón o engrosamiento de los troncos nerviosos en T1 e hiperintensidad de señal en T2 en las primeras semanas^{9,18}.

CONCLUSIONES

En la actualidad la RM y la TC-mielografía han sustituido a la mielografía clásica, en la mayoría de los hospitales. La sensibilidad en la detección de la avulsión de las raíces nerviosas cervicales es similar con ambas modalidades.

Actualmente, la RM es el método de elección en el estudio radiológico inicial de las lesiones del plexo braquial. Está indicada la realización de TC-mielografía sólo cuando el estudio obtenido sea de baja calidad por movimiento del paciente, o por otros artefactos. Normalmente, son las características técnicas del equipo de RM (tipo de antenas y secuencias disponibles) las que van a limitar la obtención de estudios de calidad diagnóstica, en algunos centros.

La TC-mielografía es una técnica más invasiva que precisa de punción lumbar previa y que, además, utiliza una fuente de radiación ionizante (Rayos X). Es por tanto, más



Figura 13. RM-mielografía. Anatomía radicular. Las técnicas de alta resolución con corte fino axial de 1,5 mm, gap 0,8, FOV 210 y matriz de 288 x 256 permiten reconstruir múltiples planos (MPR) e identificar hasta las pequeñas raicillas que forman los ramos anterior y posterior de cada nervio cervical (tiempo de adquisición 3 minutos 31 segundos).

molesta y supone un mayor riesgo para el paciente. No obstante, el TCM presenta unos resultados diagnósticos superponibles a los de la RM o incluso superiores, en muchos casos. La TCM tiene más limitaciones que la RM en las raíces más bajas del plexo. Así, la elección de unos de estos métodos dependerá de la disponibilidad específica de cada centro, tanto en equipos de TC y RM como de personal especializado.

ESTUDIOS ELECTRONEUROFISIOLÓGICOS

La información obtenida con las pruebas neurofisiológicas complementa la proporcionada por las evaluaciones neurológicas y de neuroimagen para decidir qué pacientes podrían beneficiarse de la exploración quirúrgica y en qué momento debe ésta realizarse. El examen preoperatorio nos permite diferenciar las lesiones preganglionares de las postganglionares, nos informa de la extensión de la afectación y de la severidad de la misma.

Los resultados obtenidos por las técnicas neurofisiológicas son más fiables –en cuanto a severidad, localización y extensión de la lesión–, en pacientes adultos que en las PBO, donde los hallazgos pueden ser demasiado optimistas, fundamentalmente por dos razones: en primer lugar, los neonatos presentan una inervación “extra” –raíz C7 participando en la inervación de los músculos bíceps y deltoides– que, en condiciones normales, se pierde con la maduración, pero que persiste en las lesiones de las raíces C5 y C6 supliendo este déficit y que puede originar registros eléctricos prácticamente normales en presencia de lesiones severas de las mismas. En segundo lugar, la posibilidad de encontrarnos con la persistencia de la paresia de los grupos musculares afectos, a pesar de haber sido restaurada la integridad de las estructuras nerviosas periféricas, si no se ha logrado la configuración de un esquema cortical adecuado –de ahí la importancia de la intervención diagnóstica y terapéutica precoz^{3,34,45,46}.

Es en el acto quirúrgico donde, a nuestro modo de ver, cobran mayor relevancia los estudios neurofisiológicos, permitiendo al cirujano escoger el procedimiento más adecuado, al definir la existencia o no de conductividad a través de los axones lesionados y el grado de la misma.

La evaluación postoperatoria, nos proporciona valoración pronóstica y controles evolutivos. Se trata, en definitiva, de optimizar, mediante la colaboración de las diversas disciplinas (traumatólogos, neurofisiólogos, neurorradiólogos, rehabilitadores,...), la recuperación funcional del paciente.

EVALUACIÓN PREQUIRÚRGICA

Electromiografía (EMG)

Registramos, mediante electrodo concéntrico de aguja, la actividad de: músculos dependientes del plexo, inervados por diferentes nervios periféricos pero con raíces

Antonio García López *et al.*

comunes (por ejemplo, músculos deltoides y bíceps braquial/nervios axilar y musculocutáneo/cordón posterior y lateral/raíces C5 y C6 respectivamente); de músculos dependientes de elementos nerviosos prebraquiales, determinando el estado funcional de las raíces anteriores (músculo romboides/nervio escapular dorsal/raíz C5 y músculo serrato anterior/nervio torácico largo/raíces C5, C6 y C7, este último raramente explorado en niños por el riesgo de neumotórax que supone el procedimiento); y de la musculatura paravertebral profunda del cuello, para evaluar el estado funcional de los ramos primarios posteriores de las cinco raíces. El examen de los músculos romboides, serrato anterior y musculatura profunda del cuello nos permite diferenciar las lesiones preganglionares o intraforaminales (la denervación de estos músculos nos indica lesión preganglionar) de las postganglionares o extraforaminales^{1,22}.

Valoramos la actividad espontánea (signos de denervación: potenciales de fibrilación –bifásicos– y ondas positivas), los parámetros del potencial de unidad motora (amplitud, duración, signos de reinervación colateral) o la ausencia de actividad motora voluntaria y la actividad en el máximo esfuerzo en adultos (en niños con estímulo nociceptivo): pérdida de unidades motoras o patrón de reclutamiento conservado (interferencial).

Electroneurografía (ENG)

ENG Motora. Estimula el nervio periférico, mediante electrodo percutáneo bipolar en los músculos correspondientes (conducción ortodrómica) y registra, mediante electrodo concéntrico de aguja o de superficie. Define la existencia o no de conductividad y el grado de bloqueo.

ENG Sensitiva. Estimula el nervio periférico, mediante electrodo percutáneo bipolar en el territorio sensitivo correspondiente (conducción antidrómica) y registra con electrodos de superficie (“de anillo”). Diferencia lesiones preganglionares (potencial evocado sensitivo conservado a expensas del ganglio dorsal) y postganglionares (potencial evocado sensitivo ausente). En lesiones proximales al ganglio raquídeo dorsal, el axón sensitivo periférico mantiene continuidad con el cuerpo celular y no sufre degeneración walleriana. Por lo tanto, la confirmación de potenciales de acción (NAP) en zonas anestesiadas indica lesión preganglionar.

Valoramos Latencias Motoras Distales, Velocidades de Conducción Motoras/Sensitivas y Amplitudes.

Potenciales evocados somatosensoriales (PESS)

Mediante esta técnica exploramos la vía somestésica propioceptiva. En general, se obtiene estimulando el nervio periférico (sensitivo o mixto) mediante electrodo percutáneo bipolar y registrando en diversos puntos del trayecto ascendente hasta la corteza cerebral (en punto de Erb, Cervical y Cortical) con electrodos metálicos de superficie (“de cucharilla”).

Se realizan ante sospecha de avulsión (lesión preganglionar) por signos de denervación en el territorio muscular correspondiente y potencial evocado sensitivo intacto al estimular las estructuras nerviosas dependientes. La ausencia de PESS confirma la avulsión y su obtención evidencia, normalmente, continuidad de las raíces posteriores con cordones medulares; sin embargo, se obtienen falsos positivos (PESS presentes en avulsión de raíces) ya que un pequeño número de fibras sensitivas intactas puede originar PESS normal (a cuya aparición puede contribuir la conducción antidrómica a través de fibras motoras). En niños no realizamos PESS preoperatorios en consulta porque a la dificultad de conseguir su colaboración sin sedarles se le añaden las razones expuestas anteriormente.

SEVERIDAD DE LA LESIÓN NERVIOSA. CORRELACIÓN ENTRE FISIOPATOLOGÍA Y NEUROFISIOLOGÍA

Los distintos grados de severidad de la lesión nerviosa fueron descritos por Seddon³⁸ y clasificados en I Neurapraxia, II Axonotmesis y III Neurotmesis, clasificación que Sunderland extiende en dos grados más.

Neurapraxia

Es la forma clinicopatológica más frecuente y de mejor pronóstico, siendo posible la recuperación espontánea total posible en días aunque, menos frecuentemente, puede demorarse hasta 12 semanas, dependiendo de la severidad. Supone un bloqueo temporal por afectación de la mielina (axones, endoneuro y perineuro intactos), variando desde un proceso inflamatorio hasta una desmielinización local del nervio en el sitio de la lesión.

Los estudios de conducción nerviosa (ENG) ponen de manifiesto normalidad de la misma por debajo del nivel de la lesión junto con ausencia de respuesta (potencial evocado motor y/o sensitivo), disminución de la amplitud o aumento del umbral para evocar el potencial (según el grado de bloqueo) cuando estimulamos la estructura nerviosa proximalmente al lugar lesionado. En el estudio electromiográfico (EMG) no se registra actividad espontánea (potenciales bifásicos y/o ondas positivas, expresión de una lesión axonal aguda en evolución) y sí potenciales de unidad motora (PUM) de morfología, amplitud y duración normales.

Axonotmesis

Es una lesión más severa que la anterior, pero menos frecuente, con daño axonal y discontinuidad del axoplasma. Origina una degeneración walleriana, con desmielinización distal al nivel de la injuria y una degeneración axonal proximal, por lo menos hasta el nódulo de Ranvier más cercano. Endoneuro y perineuro permanecen intactos. La regeneración axonal se produce a razón de 1-3 mm/día, pudiendo llegar a ser completa o casi completa entre los 6 y los 18 meses.

Antonio García López *et al.*

En la ENG, la primera semana, el umbral para evocar potencial evocado motor (PEM) y sensitivo (PES) distal a la lesión está normal o aumentado, pero la amplitud, latencia y velocidad de conducción distal se conservan. El umbral para conseguir PEM/PES va aumentando progresivamente hasta que los nervios distales a la lesión son inexcitables entre 1 y 2 semanas. En la EMG se registra actividad espontánea (signos de denervación) a las 3 semanas de la lesión en adultos (antes en músculos más próximos al lugar de la lesión que en los más distales, por progresión de la degeneración walleriana) y más precozmente en niños; los PUM pueden estar ausentes (lesión axonal total) o, si aparecen (lesión axonal parcial) y ha transcurrido el tiempo suficiente para que se produzca la reinervación, ser polifásicos o presentar potenciales satélites.

Neurotmesis

Existe lesión de mielina, axones y endoneuro (tejido conectivo perineural intacto). Los hallazgos neurofisiológicos son similares a los de las lesiones de grado II pero en el grado III es imposible la recuperación completa espontánea.

Lesión de la mielina + axones + endoneuro + tejido conjuntival perineural

Es la más severa de las lesiones que mantienen la continuidad del nervio. Indistinguible de grado II y III por los hallazgos neurofisiológicos (salvo persistencia de PES distal en ausencia de PEM y presencia de actividad espontánea, en casos de avulsión con lesión preganglionar).

Sección completa

Lesión nerviosa mixta

Grado introducido por Mackinnon para describir combinaciones de distintos grados de lesión en una estructura nerviosa, donde unos fascículos pueden permanecer funcionantes, mientras que otros requerirían intervención quirúrgica para su restauración.

EVALUACIÓN POSTQUIRÚRGICA

A 6-8 meses de la cirugía, realizamos:

Electromiografía

Siendo signos de buen pronóstico (Figura 14):

- Potenciales de unidad motora de configuración y reclutamiento normales.
- Ausencia de actividad espontánea.

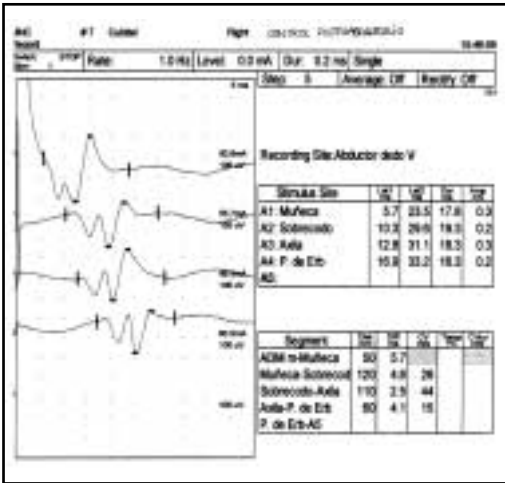


Figura 14. Estimulación de nervio cubital (desde punto de Erb) tras injerto de nervio sural en cordón medial.

– Presencia de signos de reinervación colateral.

Electroneurografía

Son signo de buen pronóstico la recuperación de la conductividad (con ausencia de bloqueos/bloqueos parciales) de las estructuras nerviosas, orientándonos la amplitud de la respuesta sobre el número de axones funcionales y la velocidad de conducción sobre el grado de mielinización (Figura 15).

TESTS INTRAOPERATORIOS

El estudio clínico y las pruebas complementarias son bastante orientativos, pero el diagnóstico definitivo de las lesiones del plexo braquial se establece en la exploración quirúrgica. Sin embargo, con la exploración supraclavicular normal permanecen ocultas las lesiones que aparecen dentro del agujero de conjunción, es decir las lesiones radiculares intradurales. El conocimiento de estas lesiones es fundamental para una decisión sobre qué nervio reparar. Para afinar este diagnóstico se han diseñado una serie de pruebas que hay que realizar intraoperatoriamente. Por otra parte, en las lesiones en continuidad, a veces, surgen dudas sobre la funcionalidad del nervio o dónde se deben realizar las secciones nerviosas de los neuromas

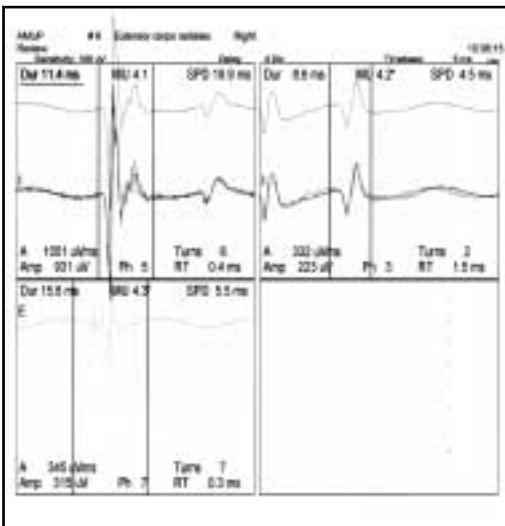


Figura 15. Signos de reinervación colateral (PUMs polifásicos).

para restablecer la continuidad del nervio con injertos. La experiencia del cirujano, el examen macroscópico de los nervios y microscópico con el microscopio quirúrgico deben ser apoyados en pruebas histológicas y electroneurofisiológicas intraoperatoriamente.

Antonio García López *et al.*



Figura 16. Electroneurofisiología intraoperatoria con estimulación previa a neuroma en nervio axilar y registro postneuroma.

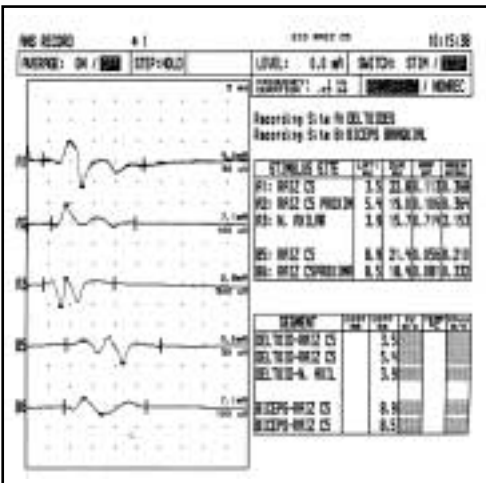


Figura 17. Estimulación de raíz C5 (proximal y distal al neuroma) y del nervio axilar o circunflejo (con registro en músculo deltoides y bíceps).

ESTUDIOS ELECTROFISIOLÓGICOS

Se requiere anestesia general sin paralización para realizar:

Electroneurografía

Registramos mediante electrodos de aguja monopolares en los músculos correspondientes mientras el cirujano estimula –utilizando una sonda bipolar estéril (de fácil manejo y que minimiza los posibles daños a las estructuras nerviosas)–, nervios periféricos, raíces y troncos nerviosos (Figura 16). De esta manera, localizamos las estructuras lesionadas y determinamos su funcionalidad que, frecuentemente, no se corresponde con el aspecto externo y la arquitectura del nervio (por ejemplo: un neuroma que conduce es susceptible de tratamiento con neurólisis mientras que, en caso contrario, optaríamos por la neurotización y/o injerto) (Figura 17). Pero también es útil para evidenciar la indemnidad de otros elementos nerviosos que, al permanecer íntegros, podrán ser trans-

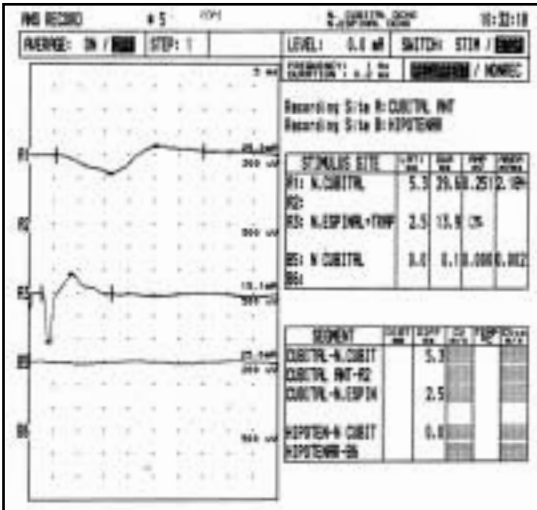


Figura 18. Estimulación de nervio cubital con registro proximal y distal (PEM ausente). Estimulación de nervio accesorio del espinal, con registro en músculo trapecio (evidenciando su indemnidad para transferir al nervio supraescapular).

feridos a los dañados (por ejemplo: transferencia del nervio accesorio del espinal al nervio supraescapular, una vez comprobada su conductibilidad) (Figura 18)¹¹.

Potenciales evocados somatosensitivos corticales o espinales (PESS)

Registra la respuesta eléctrica del cerebro a la estimulación de las fibras nerviosas. La estimulación se genera en las raíces inmediatamente después de la salida del agujero intervertebral y registramos en punto cervical y cortical (Figura 19). Sólo explora las raicillas sensitivas posteriores, lo que originará falsos positivos cuando sólo está rota la raicilla anterior (PESS normal, no fibras motoras) y falsos negativos

cuando sólo está rota la raicilla posterior (PESS nulo, buenas fibras motoras)²⁸.

Potenciales evocados motores (PEM). Estimulación eléctrica transcraneal

Los PEM son la respuesta a la estimulación eléctrica de la corteza, del sistema motor, y por tanto, una medida directa de la función motora.



Figura 19. Colocación en mesa de quirófano de cucharilla cortical de registro intraoperatorio para la realización de potenciales evocados sensitivos en parálisis braquial obstétrica.

Antonio García López *et al.*

Estimulamos corteza mediante electrodos “de cucharilla” (estímulo bipolar) y registramos en raíces, troncos y/o músculo. Evidenciamos la continuidad de las raíces anteriores con los cordones medulares. Utilizando varios puntos de registro, muy próximos entre sí, a lo largo de la estructura nerviosa, y realizando estímulos sucesivos, podemos localizar con exactitud la lesión y determinar su severidad (PEM ausente o disminuido de amplitud en mayor o menor grado –amplitud del potencial como expresión del número de axones dañados–)⁴².

Hasta el momento, sólo realizamos esta técnica –por sus posibles efectos colaterales (crisis epilépticas, quemaduras en *scalp*, arritmias,...)– en adultos, en los cuales han sido bien estudiados y minimizados variando las condiciones del estímulo. En niños, no contamos con experiencia suficiente (y en la literatura revisada se aconseja no realizar estimulación motora cortical en niños menores de 4 años) como para garantizar la eficacia/inocuidad del procedimiento^{8,34,40}.

OBSERVACIÓN DIRECTA DE LAS RAÍCES

Se ha realizado por laminectomía por vía posterior³⁵; sólo queda justificada cuando se pretenda realizar una implantación de las raíces anteriores en la médula y la intervención sea muy precoz. Actualmente, también se puede recurrir a la endoscopia raquídea y de mielomeningoceles²⁷: aunque se encuentra en fase experimental, puede ser útil para la valoración de la integridad de las raíces raquídeas.

VALORACIÓN HISTOLÓGICA INTRAOPERATORIA

Nos permite reconocer la calidad del tejido nervioso en el sitio de la reparación, y por lo tanto, determinar el nivel apropiado del injerto. En primer lugar, se han descrito métodos para determinar el carácter y localización de los axones motores y los sensitivos¹⁹, y otros para reconocer fibras mielínicas¹⁵. Pero la técnica más utilizada, por su sencillez y rapidez, es la identificación del tejido fibrótico. Tras congelación de la pieza y corte con criomicrotomo se tiñe con hematoxilina-eosina y se examina con el microscopio de luz polarizada. La fibrosis se expresa subjetivamente en forma de porcentaje sobre el área total del nervio, siendo normal cuando la fibrosis es inferior al 5%. También es útil para reconocer la existencia de un ganglio raquídeo y confirmar el diagnóstico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Balakrishnan G, Bharath K, Kadadi K. Clinical examination versus routine and paraspinal electromyographic studies in predicting the site of lesion in brachial plexus injury. *J Hand Surg* 2004; 29A: 140-143.
2. Birch R, Bonney G, Wynn Parry CB. Surgical disorders of the Peripheral Nerves. Edinburgh: Churchill Livingstone; 1998.
3. Bisinella GL, Birch R, Smith SJ. Neurophysiological prediction of outcome in obstetric lesions of the Brachial Plexus. *J Hand Surg* 2003 Apr; 28(2): 148-152.

4. Boome RS. The brachial plexus. New York: Churchill Livingstone; 1997.
5. Camus M, Lefebvre G, Veron P. Traumatisme obstétrique du nouveau né. *J Gynecol Obstet* 1995; 14: 1033-1044.
6. Carlstedt T, Grane P, Hallin RG, Norén G. Return of function after cord implantation of avulsed spinal nerve roots. *Lancet* 1995; 346: 1323-1324.
7. Carvalho GA, Nikkiah G, Matthies C, Penkert G, Samii. Diagnosis of root avulsions in traumatic brachial plexus injuries: value of computerized tomography myelography and magnetic resonance imaging. *J Neurosurg* 1997; 86: 69-76.
8. Colon AJ, Vredeveld JW, Blaauw G, Slooff ACJ, Richards R. Extensive Somatosensory Innervation in Infants with Obstetric Brachial Palsy. *Clin Anat* 2003; 16: 25-29.
9. Doi K, Otsuka K, Okamoto Y, Fujii H, Hattori Y, Baliarsing AS. Cervical nerve root avulsion in brachial plexus injuries: magnetic resonance imaging classification and comparison with myelography and computerized tomography myelography. *J Neurosurg* 2002; 96(3 Suppl): 277-84.
10. Ecker JL, Greenberg JA, Norwitz ER, Nadel AS, Repke JT. Birth weight as a predictor of brachial plexus injury. *Obstet Gynecol* 1977; 89: 643-647.
11. García-Fernández M, Cabrero-Martín B, González-Hidalgo M, Franco-Carcedo C, García-López A. Intraoperative electroneurography of brachial plexus. *Clin Neurophysiol* 2002; 113 (S1): 76.
12. García-López A, López-Durán L. Tema de actualización SECOT: Cronología en el tratamiento de las lesiones del plexo braquial. *Rev Ortop Traumatol* 2003; 47: 73-82.
13. García-López A. Diagnóstico de las parálisis traumáticas del plexo braquial. *Jano Traumatol* 2000; 2: 11-14.
14. Gasparotti R, Ferraresi S, Pinelli L. Three-dimensional MR myelography of traumatic injuries of the brachial plexus. *Am J Neuroradiol* 1997; 18: 1733-1742.
15. Gschmeissner SE, Pereira JH, Cowley SA. The rapid assessment of nerve stumps. *J Bone Joint Surg* 1991; 73B: 688-689.
16. Hardy AE. Birth injuries of brachial plexus: incidence and prognosis. *J Bone Joint Surg* 1981; 63B: 98-101.
17. Hayashi N, Yamamoto S, Okubo T. Avulsion injury of cervical nerve roots: Enhanced intradural nerve roots at MR imaging. *Radiology* 1998; 206: 817-822.
18. Hems TEJ, Birch R, Carlstedt T. The role of magnetic resonance imaging in the management of traction injuries of the adult brachial plexus. *J Hand Surg* 1999; 24B: 550-555.
19. Kanaya F, Jevans AW. Rapid histochemical identification of motor and sensory fascicles: preparation of solutions. *Plast Reconstr Surg* 1992; 90.3: 514-515.
20. Kufeld M, Claus B, Campi A, Lanksch WR, Benndorf G. Three-dimensional rotational myelography. *Am J Neuroradiol* 2003; 24(7): 1290-1293.
21. Landi A, Copeland. Value of the Tinel sign in brachial plexus lesions. *Ann Royal Coll Surg Eng* 1979; 61: 470-471.
22. Leffert RD. Clinical diagnosis, testing, and electromiographic study in brachial plexus traction injuries. *Clin Orthop* 1988; 237: 24-31.
23. León C. Análisis de las lesiones sufridas por motociclistas. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 1990.
24. Marcus JR, Clarke HM. Management of obstetrical brachial plexus palsy evaluation, prognosis, and primary surgical treatment. *Clin Plast Surg* 2003 Apr; 30(2): 289-306.
25. Marshall RW, De Silva RDD. Computerised axial tomography in traction injuries of the brachial plexus. *J Bone Joint Surg* 1986; 68B: 734-738.
26. Midha R. Epidemiology of brachial plexus injuries in a multitrauma population. *Neurosurg* 1997; 40: 1182-1189.

Antonio García López *et al.*

27. Monsivais JJ, Narakas AO, Turkof E, Sun Y. The endoscopic diagnosis of root avulsion in the brachial plexus. Presented at the XI Symposium on brachial plexus Surgery. Lausanne, February 1994.
28. Murase T, Kawai H, Masatomi T, Kawabata H, Ono K. Evoked spinal cord potentials for diagnosis during brachial plexus surgery. *J Bone Joint Surg* 1993; 75B: 775.
29. Murphey F, Hartung W, Kirklín JW. Myelographic demonstration of avulsion injury of the brachial plexus. *AJR Am Journal Roentgenology* 1947; 58: 102-105.
30. Nakamura T, Yabe Y y Horiuchi Y. Magnetic resonance Myelography in brachial plexus injury. *J Bone Joint Surg* 1997; 79B: 764-769.
31. Narakas AO. The treatment of brachial plexus injuries. *Int Orthop* 1985; 9: 29-36.
32. Oberle J, Antoniadis G, Rath SA. Radiological investigations and intra-operative evoked potentials for the diagnosis of nerve root avulsion: evaluation of both modalities by intradural root inspection. *Acta Neurochirurgica* 1998; 140: 527-531.
33. Ochi M, Ikuta Y, Watanabe M. The diagnostic value of MRI in traumatic brachial plexus injury. *J Hand Surg* 1994; 19B: 55-59.
34. Papazian O, Alfonso I, Grossman JAI. Evaluación neurofisiológica de los niños con parálisis del plexo braquial obstétrica. *Rev Neurol* 1998; 27 (156): 263-270.
35. Privat JM, Mailhe D, Bonnel F. Hemilaminectomie cervicale exploratrice et neurotisation précoce du plexus brachial. *Neurochirurgie* 1982; 28: 107-113.
36. Rosson JW. Closed traction lesions of the brachial plexus – an epidemic among young motor cyclists. *Injury* 1988; 19: 4-6.
37. Schenker M, Birch R, Diagnosis of the level of intradural rupture of the rootlets in transaction lesions of the brachial plexus. *J Bone Joint Surg* 2001, 83 B(6): 916-20.
38. Seddon HJ. Three types of nerve injury. *Brain* 1947; 66: 237-288.
39. Sloof ACJ. Obstetric brachial plexus lesions. En: Boome RS ed. The brachial plexus. New York: Churchill Livingstone; 1997, 89-106.
40. Smith SJM. The role of neurophysiological investigation in traumatic brachial plexus injuries in adults and children. *J Hand Surg* 1996; 21B: 145-148.
41. Tavakkolizadeh A, Saifuddin A, Birch R. Imaging of Adult Brachial Plexus Traction Injuries. *J Hand Surg* 2001; 26B 3:183-191.
42. Turkof E, Millesi H, Turkof R, Pfundner P y Mayr N. Intraoperative electroneurodiagnostics (transcranial electrical motor evoked potentials) to evaluate the functional status of anterior spinal roots and spinal nerves during brachial plexus surgery. *Plastic Reconstruct Surg* 1997; 99: 1632-1641.
43. Uetani M, Hayashi K, Hashmi R. et al. Traction injuries of the brachial plexus: signal intensity changes of the posterior cervical paraspinal muscles on MRI. *J Comput Assist Tomogr* 1997; 21: 790-795.
44. Volle E, Assheuer J, Hedde JP. Radicular avulsion resulting from spinal injury: assessment of diagnostic modalities. *Neuroradiology* 1992; 34: 235-240.
45. Vredeveld JW. An EMG protocol for examining lesions of brachial plexus. *Electroencephalography Clin Neurophysiol* 1996; 99: 299.
46. Vredeveld JW, Blaauw G, Sloof BACJ, Richards R, Rozeman SCAM. The findings in paediatric obstetric brachial palsy differ from those in older patients: a suggested explanation. *Develop Med Child Neurol* 2000; 42:158-161.
47. Walker AT, Chaloupka JC, De Lotbiniere ACJ. Detection of nerve rootlet avulsion on CT myelography in patients with birth palsy and brachial plexus injury after trauma. *AJR Am J Roentgenology* 1996; 167: 1283-1287
48. Yeoman PM. Cervical myelography in traction injuries of the brachial plexus. *J Bone Joint Surg* 1968; 50B: 253-260.