

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**PROPUESTA DE PROTOCOLO PARA NEUROMONITOREO
INTRAOPERATORIO EN CIRUGÍA DE DEFORMIDAD DE COLUMNA:
ESCOLIOSIS IDIOPÁTICA Y ESCOLIOSIS DEGENERATIVA**

Trabajo Final de Graduación sometido a la consideración del Comité Director del Programa de Estudios de Posgrado en Medicina Física y Rehabilitación para optar por el grado y título de Especialista en Medicina Física y Rehabilitación

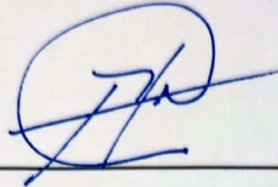
Dr. Javier López Quirós
Sustentante

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

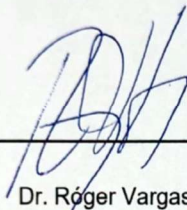
Agradecimientos

Agradezco a mis padres, a quienes les debo todo, por su apoyo y amor siempre presente e incondicional; a Claudia, por su elección diaria de acompañarme y creer en mí; a mis hermanos, en quienes puedo depender para un consejo o desahogue; al Dr. Zárate y el Dr. Vargas, por su tutoría y paciencia; a la Dra. Cordero, el comité director, y todos mis profesores y maestros, por enseñarme el mundo de la rehabilitación y la importancia de ser un profesional de calidad; y a mis compañeros residentes y amigos, junto a quienes he vivido de cerca la gratificante experiencia de esta residencia.

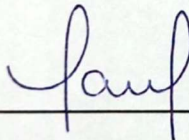
Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Comité Director del Posgrado de Medicina Física y Rehabilitación de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Especialista en Medicina Física y Rehabilitación.



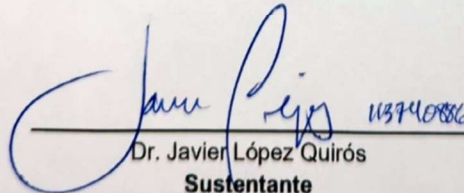
Dr. Randall Zárate Sandí
Médico Especialista en Medicina Física y Rehabilitación
Tutor



Dr. Róger Vargas González
Médico Especialista en Medicina Física y Rehabilitación
Lector



Dra. Laura Cordero Molina
Médico Especialista en Medicina Física y Rehabilitación
Coordinadora Nacional del Posgrado de Medicina Física y Rehabilitación



Dr. Javier López Quirós
Sustentante
Presentada: 8 marzo 2022

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	II
Hoja de aprobación	Error! Bookmark not defined.
Tabla de Contenidos	IV
Lista de Tablas	VI
Lista de Figuras	VII
Lista de Abreviaturas	VIII
Introducción	1
Justificación	2
Objetivo principal:	2
Objetivos específicos:	2
Capítulo 1: Generalidades	3
1.1 Epidemiología cirugía columna.....	3
1.2 Anatomía de columna.....	3
1.3 Anatomía de médula espinal	4
1.3.1 Anatomía longitudinal.....	4
1.3.2 Anatomía transversal.....	5
1.4 Biomecánica básica.....	7
1.5 Patología espinal relevante	7
1.5.1 Escoliosis.....	7
1.5.2 Escoliosis Idiopática.....	8
1.5.3 Escoliosis degenerativa.....	10
1.6 Generalidades quirúrgicas en escoliosis.....	11
Capítulo 2: Neurofisiología	14
2.1 Generalidades neurofisiología	14
2.2 Pruebas neurofisiológicas relevantes a cirugía espinal.....	15
2.2.1 Potenciales Evocados Somatosensoriales (PESS)	15
2.2.2 Potenciales Evocados Motores Transcraneales (PEM).....	16
2.2.3 Electromiografía (EMG).....	17
2.2.4 Prueba de tornillos	18
2.2.5 Ondas F - Reflejo H - Reflejo bulbocavernoso	18
2.2.6 Electroencefalografía (EEG)	19
2.3 Breve historia del NMIO.....	21
2.4 Evidencia para NMIO en cirugía de escoliosis.....	22

Capítulo 3: Guía práctica para neuromonitoreo intraoperatorio	24
3.1 Selección de Pacientes	24
3.2 Planificación preoperatoria	25
3.2.1 Valoración del paciente	25
3.2.2 Selección de modalidades de NMIO	26
3.3 Consideraciones anestésicas para NMIO	29
3.3.1 TIVA.....	29
3.4 El profesional en NMIO.....	31
3.5 Instrumentación.....	32
3.6 Montaje	32
3.6.1 PESS	33
3.6.2 PEM.....	33
3.6.3 EMG y Prueba de tornillos	34
3.7 Manejo transoperatorio.....	35
3.7.1 PESS	36
3.7.2 PEM.....	36
3.7.3 EMG.....	36
3.7.4 Prueba de tornillos	37
3.8 Criterios de alarma	37
3.8.1 PESS	37
3.8.2 PEM.....	38
3.8.3 EMG.....	38
3.8.4 Prueba de Tornillos	39
3.9 Causas de alteraciones	39
3.9.1 Técnicas	39
3.9.2 Farmacológicas.....	39
3.9.3 Sistémicas.....	39
3.9.4 Quirúrgicas.....	40
3.10 Respuesta a alarmas.....	40
3.11 Consideraciones finales NMIO	41
Conclusiones	42
Referencias bibliográficas.....	43
Anexo 1.....	48
Anexo 2.....	49

Lista de Tablas

Tabla 1 Fortalezas y debilidades de las modalidades de NMIO recomendadas para cirugía de corrección de escoliosis.....	28
Tabla 2 Efecto de los distintos fármacos anestésicos sobre los potenciales evocados.....	31
Tabla 3 Selección de músculos según raíz predominantemente representada.....	34

Lista de Figuras

Figura 1 Anatomía vertebral.....	4
Figura 2 Anatomía longitudinal médula espinal.....	5
Figura 3 Anatomía transversal médula espinal.....	6
Figura 4 Ángulo de Cobb.....	9
Figura 5 Instrumentación posterior.....	12
Figura 6 Potenciales evocados somatosensoriales.....	16
Figura 7 Prueba de tornillos.....	18

Lista de Abreviaturas

CAM: concentración alveolar media

EEG: electroencefalografía

EIA: escoliosis idiopática del adolescente

EMG: electromiografía

NMIO: neuro-monitoreo intraoperatorio

PEM: potenciales evocados motores transcraneales

PESS: potenciales evocados somatosensoriales

TIVA: anestesia total intravenosa, por sus siglas en inglés

TOF: prueba de tren de cuatro (estímulos), por sus siglas en inglés



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

SEP Sistema de
Estudios de Posgrado

Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.

Yo, Javier López Quirós, con cédula de identidad 1-1374-0886, en mi condición de autor del TFG titulado PROPUESTA DE PROTOCOLO PARA NEUROMONITOREO INTRAOPERATORIO EN CIRUGÍA DE DEFORMIDAD VERTEBRAL: ESCOLIOSIS IDIOPÁTICA Y ESCOLIOSIS DEGENERATIVA.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI NO *

*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.


FIRMA ESTUDIANTE

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

San Ramón, 15 de marzo de 2022

Universidad de Costa Rica


A quien corresponda:

Por este medio, yo Fabián Madrigal Rojas, cédula 112420059, graduado de la Universidad de Costa Rica en Filología Española, hago constar que he revisado el Trabajo Final de Graduación del Programa de Estudios de Posgrado en Medicina Física y Rehabilitación: “Propuesta de protocolo para neuromonitoreo intraoperatorio en cirugía de deformidad de columna: escoliosis idiopática y escoliosis degenerativa”, elaborado por la estudiante Javier López Quirós.

Se han corregido los aspectos referentes a la estructura gramatical, acentuación, ortografía y estilo. También, se revisó la utilización adecuada del sistema de citación y se realizaron las recomendaciones necesarias que deben ser seguidas por el autor de la tesis para cumplir con dicho formato. La revisión de este aspecto se realizó a partir de las citas explicitadas por el autor del documento, en quien recae la responsabilidad de respetar los derechos de autor de las fuentes que hubiera consultado.

Efectuada esta revisión, el documento cumple con todos los requisitos formales exigidos y está listo para ser presentado y defendido en la Universidad. Para cualquier información adicional que sea requerida con respecto al documento o a la revisión, mi correo electrónico es fabian.madrigal@ucr.ac.cr y mi teléfono 8347-5727.

Atentamente,



Fabián Madrigal Rojas
112420059

Introducción

En los últimos treinta años, el monitoreo neurofisiológico intraoperatorio se ha establecido como el método más ampliamente utilizado para detectar tempranamente, y potencialmente prevenir, daño neurológico durante diversos procesos quirúrgicos. Se basa en la selección y combinación de técnicas de estudios neurofisiológicos de acuerdo con las estructuras nerviosas en riesgo.

Con el propósito de elaborar una propuesta de protocolo para este monitoreo en la población de pacientes con escoliosis, este trabajo inicialmente hace un repaso de la teoría científico-médica subyacente. Se revisa la anatomía relevante de columna y médula, la fisiología específica aplicada, la historia natural de la patología en cuestión, las maneras de tratar la misma y las diferentes secuelas de una u otra opción.

La rama de la neurofisiología en general abarca grandes cantidades de información, por lo que el marco teórico se limita a retomar los aspectos relacionados con las funciones y pruebas específicas en la corrección quirúrgica de la escoliosis. Finalmente, el último capítulo de esta propuesta pretende dar sustento a una guía práctica, que sirva de consulta al profesional que vaya a realizar monitoreo intraoperatorio.

Justificación

Las escoliosis idiopáticas y degenerativas tienen incidencia y prevalencia relativamente altas. Son patologías de manejo individualizado, especializado y complejo. Mientras que el porcentaje *relativo* de casos que requieren manejo quirúrgico es bajo, finalmente la cantidad absoluta constituye una población significativa. La corrección quirúrgica es un proceso altamente especializado, técnicamente difícil, con una tasa de complicaciones en general alta, y con el potencial para dañar estructuras esenciales, y generar secuelas permanentes y devastadoras.

El monitoreo neurofisiológico intraoperatorio, adecuadamente realizado, constituye una línea más de defensa contra estas posibilidades. Es una habilidad clínico-práctica que es imposible dominar a través de la teoría, pero para la cual el conocimiento teórico de base es indispensable. Se justifica entonces esta propuesta de protocolo, que pretende evidenciar los aspectos fundamentales del monitoreo y ser una guía práctica para el acercamiento de los profesionales que desean capacitarse en el mismo. Para lo anterior, se han propuesto los objetivos de investigación planteados a continuación.

Objetivo principal:

- Elaborar una guía práctica, basada en evidencia, para el neuromonitoreo intraoperatorio durante cirugía correctiva de deformidad de columna vertebral.

Objetivos específicos:

- Desarrollar un marco teórico actualizado en cuanto a la anatomía, fisiología y patología relevante a la escoliosis y el neuromonitoreo intraoperatorio.
- Documentar la evidencia médico-científica que valida el uso del neuromonitoreo intraoperatorio en cirugía de columna vertebral.
- Definir las pautas prácticas a seguir por el profesional médico previo, durante y posterior a la realización del monitoreo intraoperatorio.

Capítulo 1: Generalidades

1.1 Epidemiología cirugía columna

La cirugía de columna vertebral engloba una variedad amplia de intervenciones, todas de muy alto grado de dificultad técnica, y que por consiguiente implica riesgos elevados de patología médica y complicaciones asociadas.¹ Dada la importancia y complejidad del tejido medular y el aparato óseo mecánico-postural, existen numerosas indicaciones para llevar a cabo procedimientos sobre las diferentes porciones de la columna. Entre estas se encuentra la descompresión neurológica como tratamiento de dolor, la resección de tejidos tumorales, la corrección de defectos traumáticos, congénitos y degenerativos, y la estabilización ósea, entre otros.²

A nivel mundial, se estima que al menos 250 millones de personas (un poco menos del 4% de la población mundial), son diagnosticadas cada año con alguna patología de columna vertebral.³ En Estados Unidos, el número de casos diagnosticados e intervenidos ha aumentado significativamente en la última década, realizándose un poco más de 1 millón de cirugías espinales cada año, principalmente tratándose de la fusión espinal en cerca de la mitad de los casos. Estas llegan a representar casi 80 mil millones de dólares anuales en gastos médicos asociados.⁴

1.2 Anatomía de columna

La columna vertebral es el conjunto de estructuras óseas que contiene y protege a la médula espinal y forma la cadena articular que conecta el cráneo a la pelvis.⁵ Está compuesta, en orden, de 7 vértebras cervicales, 12 torácicas, 5 lumbares, el sacro (que corresponde a la fusión bilateral y longitudinal de 5 vértebras) y el hueso del coxis (igualmente un vestigio de vértebras modificadas y fusionadas). Las vértebras son unidades óseas que consisten en un cuerpo, de donde proviene la estabilidad estructural. Del cuerpo se extienden hacia posterior los pedículos y las láminas, formando así un canal. Además, los pedículos presentan escotaduras superiores en inferiores que al unirse con las vértebras adyacentes forman los agujeros intervertebrales o neuroforámenes, que corresponden al sitio de salida de las raíces nerviosas. Hay proyecciones óseas transversas y espinosas que funcionan como sitios de inserción y origen de músculos espinales. Además hay superficies articulares con las vértebras superiores e inferiores, y que son las que proporcionan el rango de movimientos de la columna.

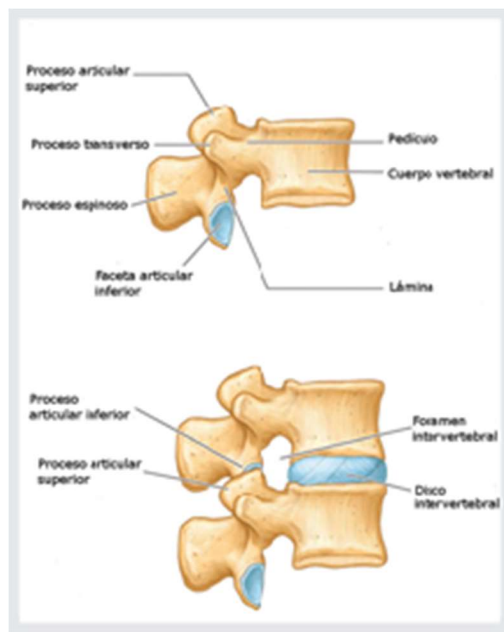


Figura 1. Anatomía vertebral. Tomado y modificado de Bican O., Minagar A., Pruitt A. The Spinal Cord A Review of Functional Neuroanatomy. Neurol Clin. (2013)

Aparte del componente óseo y cartilaginoso, existen ligamentos que recorren toda la longitud de la columna, a nivel anterior y posterior de los cuerpos vertebrales, y el ligamento amarillo que forma la parte posterior del canal medular. Hay ligamentos en cada segmento entre las apófisis espinosas, y otro que recubre las espinas a nivel posterior.⁵

De suma importancia, entre cada cuerpo vertebral (a partir de C2-C3) hay un disco intervertebral, que ayuda a soportar y distribuir peso, aumentar la movilidad, y favorecer la mecánica adecuada.⁵ Los discos intervertebrales constituyen entre 20-30% de la altura total de la columna, y su grosor varía: son más gruesos en los segmentos de mayor movilidad. Están compuestos por un anillo fibroso externo y un núcleo pulposo central, que ambos están en contacto con las placas terminales del cuerpo vertebral. Son, en conjunto, la masa de tejido avascular más grande del cuerpo humano, se hidratan y nutren por difusión. Esta propiedad los hace particularmente susceptibles a cambios degenerativos a través del tiempo.⁵

1.3 Anatomía de médula espinal

1.3.1 Anatomía longitudinal

Dentro del canal óseo, desde la unión cervicomedular hasta el nivel de L1-L2 en el adulto, se encuentra la médula espinal. Como extensión del sistema nervioso central, se encuentra

recubierta por las meninges: duramadre, aracnoides y piamadre, desde afuera hacia adentro. Está compuesta de somas (sustancia gris) y largos axones neuronales (sustancia blanca), organizados en grupos, por los cuales viajan señales ascendentes y descendentes, fungiendo de primera conexión entre el encéfalo y los nervios periféricos. Se compone de 31 segmentos; 8 cervicales, 12 torácicos, 5 lumbares, 5 sacros y 1 coccígeo. En cada segmento (con excepción de C1) tiene proyecciones ventrales y dorsales que se unen para formar un nervio espinal. Presenta ensanchamiento a nivel cervical y lumbar por contener mayor cantidad de neuronas en estos segmentos, correspondiente a las neuronas motoras del control de las extremidades.⁶

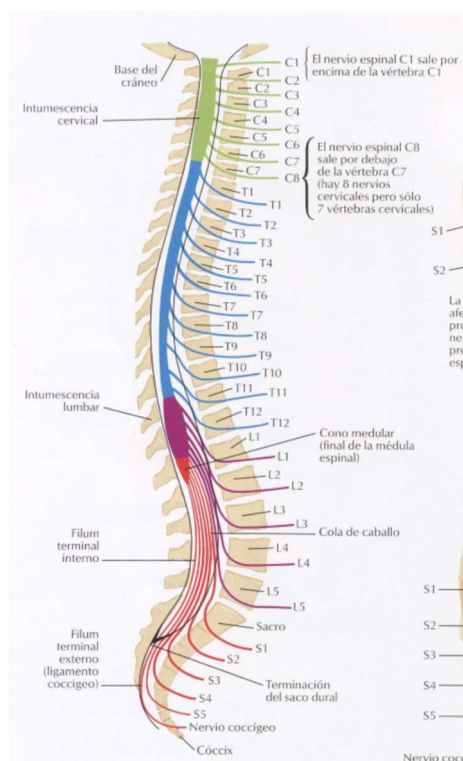


Figura 2. Anatomía longitudinal médula espinal. Tomado y modificado de Bican O., Minagar A., Pruitt A. The Spinal Cord A Review of Functional Neuroanatomy. Neurol Clin. 2013;31(1):1-18.

1.3.2 Anatomía transversal

A nivel transversal, en el centro de la médula hay columnas de sustancia gris que se organizan en astas anteriores y posteriores, de cada lado, unidas por una comisura gris, dentro de la cual se encuentra el conducto central. En los segmentos cervicales y lumbares, hay proyecciones laterales de sustancia gris, y las neuronas dentro de las astas anteriores y laterales tienen una correspondencia con los músculos; los músculos axiales tienen representación más centralizada, y los distales tienden a la periferia. Las astas posteriores contienen los núcleos de

las neuronas que reciben información aferente, y de las neuronas que forman conexiones puente con otras neuronas de la médula (interneuronas).⁶

La sustancia blanca corresponde a los axones mielinizados de las neuronas, que agrupadas viajan en tractos de manera ascendente o descendente, con funciones específicas. A grandes rasgos, se divide en cordones anterior, lateral y posterior. El cordón anterior se ubica entre la línea media y el punto de salida de las raíces nerviosas anteriores. El cordón lateral entre las salidas de las raíces nerviosas anteriores y la entrada de las raíces dorsales; y el cordón posterior desde estas hasta la línea media posterior.⁶

Dentro de los tractos ascendentes más importantes, se encuentran los tractos espino-olivario, espino-cerebeloso anterior y posterior, espino-talámico, y los fascículos gracilis y cuneatus, estos dos últimos juntos conocidos como las columnas posteriores. Dentro de los tractos descendentes, encontramos: tecto-espinal, vestibulo-espinal, retículo-espinal medial y lateral, corticoespinal anterior, rubro-espinal y el corticoespinal lateral, conocido también como tracto piramidal.⁶

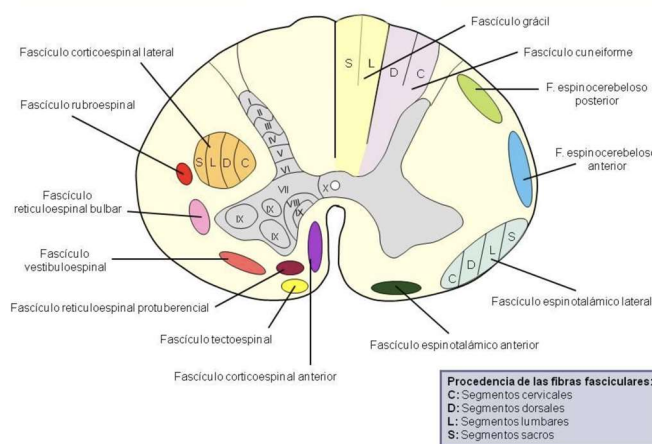


Figura 3. Anatomía transversal médula espinal. Tomado y modificado de Cho, T.A. Spinal Cord Functional Anatomy. CONTINUUM: Lifelong Learning in Neurology (2015)

El flujo sanguíneo proviene de un conjunto redundante de arterias espinales. El tercio posterior de la médula es irrigado por dos arterias espinales posteriores, mientras que los dos tercios anteriores son irrigados por la arteria espinal anterior, que se divide en dos arterias intramedulares. La arteria segmentaria medular principal es llamada la arteria de Adamkiewicz. Hay presencia también de circulación colateral; a nivel anterior de las arterias intercostales e ilíacas, y variablemente de las arterias segmentarias y radicales que vienen de la aorta, y a nivel posterior de las arterias subclavia e intercostales. La circulación colateral posterior es menos variable y más robusta, por lo que se considera menos susceptible a lesión isquémica.⁵

El drenaje venoso es robusto y variable, lo compone una red radial de capilares intramedulares, que forman las venas espinales anterior y posteriores. Estas a su vez forman un plexo venoso de 10 a 20 venas en el espacio epidural. Posteriormente drena a los plexos venosos radiculares y vertebrales, y finalmente a las venas cervicales, ácigos y hemiacigos, lumbares y sacras.⁵

1.4 Biomecánica básica

Además de su función como protector y estabilizador de la médula espinal, la columna vertebral tiene un rol biomecánico importante. Su disposición ósea tridimensional curvilínea le permite soportar cargas verticales para la bipedestación, además de movimientos de cabeza, cuello y tronco en seis grados de libertad.⁷

Los segmentos cervicales son los más móviles, presentando arcos de 80-90° de flexión, 70° de extensión, 20-40° de flexión lateral y 90° de rotación. Tiene poca tolerancia para el soporte de cargas axiales. El segmento torácico es limitado en sus arcos de movimiento, pero al mismo tiempo es más estable, en gran parte por la parrilla costal y las articulaciones costovertebrales. En esta sección se logran 25° grados de movimiento en flexión/extensión, 5° de flexión lateral y 5° de rotación, todos dentro de la cifosis fisiológica del segmento.⁸ Las vértebras lumbares tienen grandes cuerpos, más aptos para soportar fuerzas de compresión, y permite 55° de flexión/extensión, y 15° de flexión lateral y rotación. La articulación más móvil del segmento es la que está entre L4-L5.⁹ El segmento sacrococcígeo se considera funcionalmente que no tiene rango de movimiento, aunque en movilizaciones pasivas y durante el proceso de parto pueden haber de 8-10° de flexión/extensión.

1.5 Patología espinal relevante

1.5.1 Escoliosis

La escoliosis se define como una deformidad tridimensional de la columna vertebral, en la que esta se desvía de su posición normal en los planos sagital, coronal y axial, y se vuelve fija en esta postura desbalanceada. Específicamente en el plano frontal, una curvatura de hasta 10° (medida según el ángulo de Cobb) se puede considerar normal, siempre y cuando la misma no progrese en el tiempo. Es importante que en el plano sagital existen las curvas fisiológicas, pero que desviaciones significativas de los ángulos de las mismas igualmente puede constituir escoliosis. Tiene una prevalencia de 2-4% de la población general, y es más frecuente en mujeres. Pueden ser congénitas, secundarias a otro diagnóstico médico, o idiopáticas.¹⁰

1.5.2 Escoliosis Idiopática

La escoliosis idiopática constituye el 70% de los casos totales de escoliosis. Por definición, es un diagnóstico de exclusión, asignado únicamente en ausencia de causas neuromusculares, tumorales, infecciosas, traumáticas, congénitas o sindrómicas. Se clasifica según la edad de diagnóstico: infantil en menores de 3 años (1% de los casos), juvenil de los 3 a los 10 años (10% de los casos), y la escoliosis idiopática del adolescente (EIA) que constituye el 89% de los diagnosticados.¹¹

Comúnmente, los pacientes cursan asintomáticos, se suelen detectar al notarse desviación postural por parte de los padres, educadores, o en control de desarrollo y crecimiento de rutina. La prueba de Adams, en el que se valora asimetría de tronco (presencia de gibas) durante la flexión, es una herramienta útil para sospechar de la patología. El diagnóstico definitivo se realiza de manera radiológica, en la que se puede evaluar la magnitud, el tipo de curva y el estado de maduración ósea del esqueleto axial.¹⁰

La magnitud de la curva se calcula midiendo el ángulo de Cobb. De acuerdo con el método de Cobb, en un espinograma, se trazan líneas que recorran la superficie superior de la vértebra proximal más inclinada, y la superficie inferior de la vértebra más distal afectada, y luego se mide el ángulo formado por la intersección de dos líneas perpendiculares a las anteriores. Las curvas se terminan de caracterizar según los segmentos de columna involucrados, la lateralidad según la vértebra ápice y si existe la presencia o no de doble curvatura. La madurez esquelética se determina en radiografías por el signo de Risser, en el que se valora progresión de la osificación del cartílago de crecimiento en la cresta ilíaca. Este proceso se da desde la espina iliaca anterosuperior hasta la posterior, el estadio 0 corresponde a ausencia de osificación y el 5 a la madurez completa en la que no se visualiza la línea de crecimiento. Los estadios del 1-4 corresponden progresivamente a 25% incremental de avance.¹¹

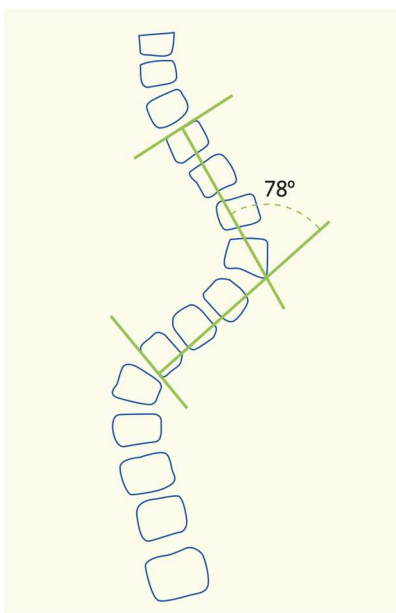


Figura 4. Ángulo de Cobb. Tomado de Alvares García de Quesas, L.I, y Nunez Giralda, A. Escoliosis idiopática. Revista Pediátrica de Atención Primaria. (2011), 13 (49), 135-146

El abordaje de la escoliosis se basa mucho en la predicción de posibilidad de progresión de la curva. No se puede a priori determinar con certeza si una curva progresará o no, pero se han identificado factores de riesgo. El factor de mayor peso es el ángulo de la curvatura. Una curva de 25° o más tiene 70% de probabilidad de progresión, mientras que una curva medida como menor de 25° no tiende a progresar en el 90% de los casos. Las mujeres tienen mayor riesgo de progresar que los hombres, la edad temprana e inmadurez ósea predicen mayor progresión, y los casos presentados previos a la pubertad también. De acuerdo con estos factores, aproximadamente 10% de las EIA van a ameritar tratamiento, y solo un 0.1-0.5% requerirá intervención quirúrgica. Una escoliosis sin tratar puede llegar a producir, además de deformidad visible: dolor, deterioro de función respiratoria, limitación funcional, y mayor índice de mortalidad. Se han descrito riesgos de aumento de la presión de la arteria pulmonar, disminución del desarrollo alveolar y de los volúmenes pulmonares, y la falla ventricular izquierda.¹⁰

A grandes rasgos, las curvas entre $25-40^\circ$, son candidatas a manejo conservador, que incluye: la observación y control, las intervenciones fisioterapéuticas y de ejercicio, y el uso de corsé, individualizado según los factores de riesgo de progresión y el puntaje de Risser. Cuando el ángulo es mayor a $45-50^\circ$, se considera generalmente una escoliosis de manejo quirúrgico, con salvedades según el contexto individual. Estas curvas son de alto riesgo de compromiso cardiovascular, y el objetivo de la cirugía es tanto rectificar la deformidad como detener la progresión de la misma.¹²

1.5.3 Escoliosis degenerativa

Después de alcanzada la madurez esquelética, la presencia de una curva mayor a los 10° se considera escoliosis en el paciente adulto. Se puede presentar en hasta 40% de la población, y se correlaciona la incidencia con la edad. La prevalencia en mujeres se mantiene también en este grupo etario¹⁴. Clásicamente, para efectos de estudio, se pueden dividir en tres tipos: las tipo 1 son las escoliosis degenerativas primarias o *de novo*, las tipo 2 son aquellas que fueron escoliosis idiopáticas de edades tempranas y ahora persisten (también conocida como progresiva), y las tipo 3 son las escoliosis secundarias, divididas en aquellas que se relacionan a patologías principalmente neuromusculares y de disimetrías de extremidades inferiores (3a) y aquellas que provienen de fracturas y deformidades osteoporóticas (subtipo 3b). Los tipos 1 y 3 se relacionan cercanamente, y otros sistemas de clasificación se valen de otras características para diferenciar pacientes que podrían pertenecer a ambos.¹⁴ Muchas veces existen en los adultos más de uno de los procesos patológicos, por lo que hay considerable traslape entre estos tipos, y puede ser difícil discernir el proceso primario que ocurre en determinada curva.¹³

La escoliosis degenerativa primaria, también conocida como discogénica o *de novo*, se origina del deterioro asimétrico de los discos intervertebrales, muy predominantemente en el segmento lumbar. Al perderse la integridad de los discos en uno o más niveles, se da una rotación de las facetas con tendencia a la lateralización y frecuentemente desviación frontal de la vértebra. Se inicia un ciclo patológico en el que esta asimetría ocasiona mayor desbalance en el soporte de carga axial, favoreciendo más la continuación de la degeneración y el aumento de la curva lateral y la tendencia a cifosis lumbar. Tienden a ser menos pronunciadas en curvatura e involucrar menos vértebras que la EIA. Con el progreso de la asimetría, se asocian a otras patologías de disco y columna, incluyendo herniaciones, estenosis de canal y de neuroforámenes, espondilosis, listesis e inestabilidad, osteofitos y otras osificaciones, y artrosis facetaria.¹⁴ La osteoporosis juega un papel muy importante en el desarrollo y progreso de cualquier curva escoliótica en el adulto. La desmineralización conlleva a un aumento de incidencia de fracturas vertebrales, y estas pueden desencadenar o exacerbar las deformidades e inestabilidad espinal. Además, el hueso osteoporótico es un mal sustrato para la instrumentación.¹³

La escoliosis degenerativa en adultos tiene una presentación clínica distinta a la EIA.¹⁵ Como primera diferencia, usualmente el motivo de consulta es el dolor. Este tiene una alta prevalencia, entre 60-80% de los pacientes adultos con escoliosis aquejan dolor lumbar. Tiende a ser constante durante la bipedestación y difusamente localizado sobre la espalda baja. Se

propone que este proviene principalmente de los cambios degenerativos en facetas articulares y de fatiga muscular por el desbalance a nivel espinal. Cercanamente asociado, este grupo de pacientes también puede presentar dolor radicular, irradiado a miembros inferiores, y con síntomas de claudicación intermitente e inestabilidad para la marcha. Igualmente, de acuerdo con el grado de estenosis foraminal y/o del compromiso del canal medular, puede ocasionalmente haber franco déficit neurológico, manifestado como un nivel sensitivo, debilidad con nivel motor, vejiga o intestino neurogénico. Esta manifestación tiende a ser la indicación más clara para el manejo quirúrgico. La progresión de la curva también es de naturaleza distinta en este grupo: en la EIA, al detenerse el crecimiento longitudinal con el cierre de las epífisis, el riesgo de progresión disminuye vertiginosamente, en contraste con el ciclo vicioso de la escoliosis degenerativa, en el que los vectores de las fuerzas de carga aplicadas y la asimetría de disco se magnifican entre sí.¹⁵

Un grupo importante de pacientes adultos con escoliosis son aquellos que ya se han sometido a cirugías correctivas, especialmente aquellas realizadas con técnicas de primera generación. Existe un fenómeno en el que la porción fijada de columna vertebral ejerce una fuerza de palanca sobre las vértebras adyacentes (tanto a nivel superior como inferior), y 15 a 20 años posterior a la cirugía inicial, se comienza a producir una angulación secundaria, generalmente con características degenerativas.¹⁵ Se tiende a producir muy frecuentemente la pérdida de la lordosis lumbar, y es común la presencia de estenosis foraminal en los segmentos adyacentes.¹⁵

1.6 Generalidades quirúrgicas en escoliosis

Las principales indicaciones de manejo quirúrgico en EIA son una curva mayor a 50 grados y compromiso de la fusión cardiopulmonar. En la escoliosis degenerativa, el dolor o la evidencia de compromiso neurológico son las indicaciones principales. Los objetivos principales de la cirugía son disminuir las curvaturas, rotaciones y deformidades para lograr mejor equilibrio sagital, obtener descompresión de estructuras neurológicas, evitar complicaciones y secuelas de una enfermedad no tratada, y eventualmente, mejorar la calidad de vida de los pacientes.¹⁵ La cirugía de columna vertebral se considera de muy alta complejidad, y la gran mayoría de la literatura consultada recomienda que se realice por equipos de cirujanos, ya sean de la rama de la ortopedia o de neurocirugía, con entrenamiento sub-especializado en columna y médula.^{12,16}

Las técnicas quirúrgicas utilizadas para la corrección de la escoliosis han experimentado grandes avances tecnológicos en los últimos 20 años. Se dividen en dos grandes categorías: aquellas en las que se realiza fusión vertebral y en las que no.¹⁶ La fusión posterior con

instrumentación es la cirugía de mayor trayectoria en la patología, y todavía se considera la de preferencia. La instrumentación ha progresado con el tiempo, clásicamente, una vez disecados los planos superficiales y estando expuesta la columna vertebral, se realiza una osteotomía descompresiva (laminectomía y resección facetaria), se introducen tornillos en los pedículos vertebrales, estos se anclan a varillas longitudinales, y estas se comprimen, rotan y posicionan para corregir la deformidad.¹⁶ Hoy en día se utilizan además materiales adicionales, como ganchos y alambres sublaminares, para lograr mejor acople vertebral. El proceso análogo desde la vía de abordaje anterior se utilizó por mucho tiempo para la corrección de curvas toracolumbares y lumbares, pero su uso ha disminuido mucho al no demostrar ser superior en la corrección de curvas y presentar riesgos de daño aórtico y mayor compromiso pulmonar postoperatorio, además de tiempos quirúrgicos y de recuperación mayores. Aun así, de acuerdo con el criterio del cirujano, infrecuentemente se presentan casos en los que se utiliza el abordaje.¹² Las cirugías en las que no se realiza fusión son menos efectivas en su corrección y mantenimiento, y se opta por ellas en casos limitados y específicos: en escoliosis paralítica para mantener movilidad, en pacientes muy jóvenes para limitación de crecimiento longitudinal, y en pacientes en los que se usan prótesis de costillas expandibles para mejorar función pulmonar.¹⁶

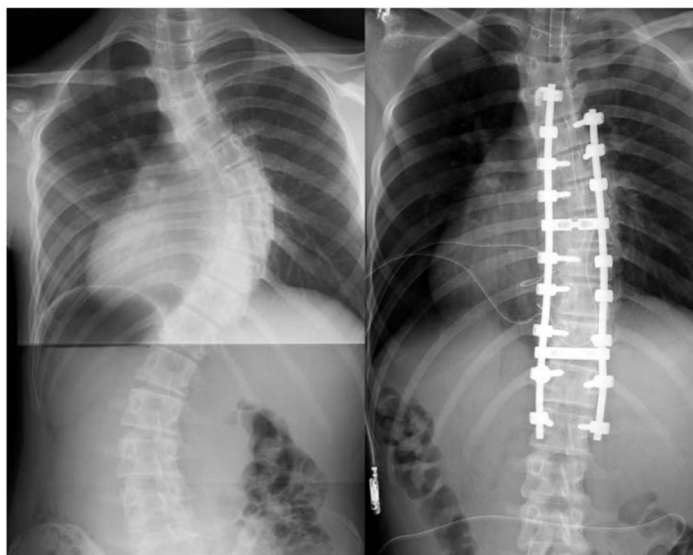


Figura 5. Instrumentación posterior. Tomado de Maruyama, T, y Takeshita, Katsushi. Surgical treatment of scoliosis, a review of techniques currently applied. *Scoliosis*. (2008). 3(6): 101-106

La alta complejidad que implica la cirugía de escoliosis lleva a una tasa relativamente alta de complicaciones reportada en la literatura, hasta un total de 40% de los pacientes intervenidos presenta alguna complicación (de cualquier severidad). Los riesgos del uso de anestesia general,

y los que tienen en común todos los procedimientos quirúrgicos, persisten: sangrado, embolismo, fallo respiratorio, isquemia e infección. Otro grupo de complicaciones posibles son las musculoesqueléticas: fallo de la instrumentación (principalmente la salida de tornillos pediculares), formación de pseudoartrosis, la enfermedad de segmento adyacente, y la evolución sub-óptima de la corrección requiriendo de una re-intervención.¹⁵

El grupo de complicaciones de mayor severidad es el de las lesiones a estructuras neurológicas, ya sean nervios, plexos y fundamentalmente la médula espinal.^{1,17,35} Los mecanismos causales incluyen: lesión traumática o contusión directa, compresión postoperatoria secundaria a hematomas epidurales, isquemia por hipoperfusión sistémica/sangrado, e isquemia durante las maniobras correctivas de distracción y reducción de deformidad.¹ La literatura describe aproximadamente un 2% de prevalencia de lesiones de médula espinal (de cualquier grado) en cirugía de escoliosis. Se considera que ese riesgo aumenta según la extensión de los segmentos.^{17,35}

Capítulo 2: Neurofisiología

2.1 Generalidades neurofisiología

Las neuronas son las células principales, tanto en estructura como en función, del sistema nervioso. Se estima que hay aproximadamente 100 billones de neuronas en el cuerpo humano, y se han identificado hasta 200 distintos tipos de las mismas. Se componen de un cuerpo celular llamado soma, donde se encuentra el núcleo, de pequeñas ramas llamadas dendritas a través de las cuales se recibe información y se forman conexiones, y de una proyección larga llamada axón, normalmente recubierta de una vaina de mielina, por la cual se envían señales.¹⁸

La comunicación a través de las neuronas, conocida como neurotransmisión, se da gracias a complejos procesos electroquímicos dentro y fuera de la célula. En reposo, se mantiene un gradiente de iones en los espacios intra y extracelulares, que produce un diferencial de carga eléctrica a través de la membrana neuronal: la capa interior de la membrana conserva una carga negativa relativa a la capa exterior. En una milésima de segundo, la descarga de un estímulo eléctrico inicial abre los canales de sodio voltaje-dependientes de una porción de la membrana, hay una entrada rápida de iones de sodio a través de estos canales, y se revierte la relación relativa de la gradiente, es decir, se disminuye la carga negativa interna y se positiviza. Este fenómeno se conoce como una despolarización, y es para todos los efectos el equivalente a una corriente eléctrica. Si la despolarización local cruza un umbral crítico, los mismos cambios electroquímicos se comienzan a propagar por su propio ímpetu a lo largo de la longitud del axón, y esto se conoce como un potencial de acción. Después de pasar el potencial de acción se restauran las concentraciones iónicas fisiológicas y la membrana se repolariza.¹⁸

La despolarización también estimula la entrada del calcio como un mecanismo de transmisión: este calcio causa dentro de la neurona el movimiento y liberación de vesículas que contienen péptidos y proteínas, que a su vez funcionan como neurotransmisores sinápticos, difundiendo en el espacio distal a la terminación del axón y acoplándose a receptores en la membrana postsináptica (célula receptora).¹⁹ De acuerdo con el tipo y cantidad de transmisor liberado, y los receptores activados, la señal producirá en la célula postsináptica un efecto excitatorio o inhibitorio, y el efecto continuará propagándose.¹⁹

Los estudios neurofisiológicos, realizados tanto en consultorios como en el laboratorio, se encargan de manera variable de producir, captar y analizar las señales eléctricas (es decir, los potenciales de acción), que median en los distintos procesos fisiológicos del sistema nervioso y sus conexiones. Esto se puede hacer tanto en actividad espontánea, es

decir aquella que se genera de manera intrínseca en el cuerpo, como en actividad evocada, que corresponde a la que se induce por estímulos externos. Se utilizan electrodos que, colocados en distintas estructuras anatómicas, reproducen y registran de manera estandarizada estas señales y las transmiten a través de cables. Luego, estas se deben filtrar, amplificar, promediar, digitalizar y procesar por medio de computadores, produciendo una representación gráfica o auditiva que es finalmente la que se interpreta clínicamente.¹⁹

De acuerdo con la convención en estudios electrofisiológicos, a partir de estas señales eléctricas se captan y se grafican los cambios de voltaje en el tiempo, produciendo una serie de picos y valles. Las ondas negativas se grafican hacia arriba y las positivas hacia abajo. En esta gráfica, se puede cuantificar la altura o magnitud desde un pico máximo al valle contiguo (en voltios), conocido como la amplitud. Igualmente, la latencia es el tiempo transcurrido desde el estímulo a determinado pico o valle, ya identificado y seleccionado por convención, usualmente por su prominencia y reproducibilidad.

2.2 Pruebas neurofisiológicas relevantes a cirugía espinal

2.2.1 Potenciales Evocados Somatosensoriales (PESS)

Consisten en estímulos eléctricos bipolares, efectuados de manera repetida en varios nervios periféricos, que producen una despolarización de la membrana neuronal. Esta despolarización se propaga como potencial eléctrico, y se puede captar en diferentes niveles de su trayecto, usualmente a nivel transcraneal sobre la corteza sensitiva primaria (complementariamente sobre plexos y a nivel cervical).³¹ La transmisión se propaga inicialmente por el nervio periférico, luego por el plexo correspondiente, pasa por el ganglio de la raíz dorsal, y asciende a la corteza contralateral por los axones de los tractos dorsomediales (columnas posteriores) de la médula espinal, que normalmente conducen las señales sensitivas de propiocepción, vibración, y parcialmente, del tacto.¹⁹

En miembros superiores, los estímulos generados sobre el nervio mediano (o ulnar) nivel del antebrazo, se pueden captar a nivel de cuero cabelludo, sobre el giro postcentral contralateral, en promedio 20ms después. Aparece como una onda negativa, y por convención se llama a esta onda la N20.^{19,31,32} En miembros inferiores, el sitio usual de estímulo es sobre el nervio tibial posterior, produciendo una onda positiva característica 37-40ms después, conocido como el potencial u onda P40.^{19,31,32}

Las amplitudes de los PESS son pequeñas relativas al ruido eléctrico general de la infraestructura moderna de centros de salud, por lo que se promedian como mínimo 100, y usualmente hasta 300 señales individuales (de cada sitio estimulado), para obtener los trazos característicos óptimos para análisis. Esto conlleva necesariamente un período de tiempo para obtener suficientes señales para el promedio adecuado, lo que puede crear retrasos en la detección de cambios.³²

En el contexto de NMIO, se consideran significativos la disminución de un 50% de la amplitud del potencial, y/o el aumento del 10% de la latencia³².

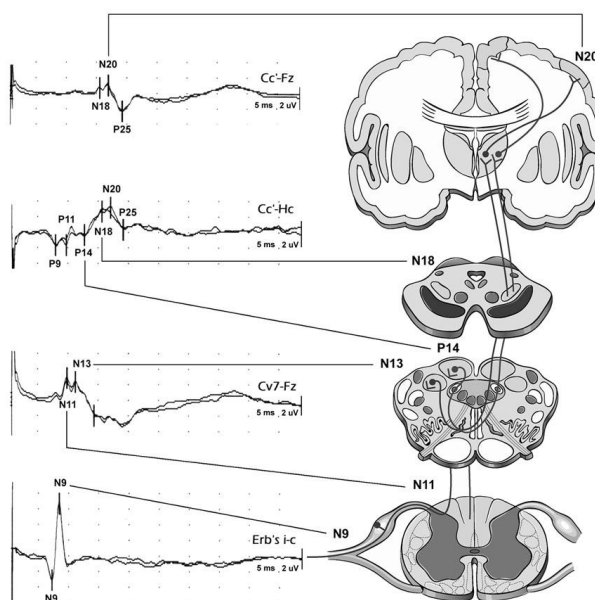


Figura 6. Potenciales Evocados Somatosensoriales. Tomado de MacDonald, D.B., et al. Recommendations of the International Society of Intraoperative Neurophysiology for intraoperative somatosensory evoked potentials. *Clinical Neurophysiology*. (2018).

2.2.2 Potenciales Evocados Motores Transcraneales (PEM)

La activación de las vías de señalización motoras a través de la bóveda craneana nos permite cuantificar la relación entre un estímulo cortical y la respuesta motora (muscular), brindando así información acerca del aparato motor/efector completo: las áreas corticales y vías motoras involucradas, y especialmente el tracto corticoespinal.¹⁹

Se colocan electrodos de aguja espiral sobre el giro precentral, que al ser activados eléctricamente, mediante un multipulso de alto voltaje y mínima duración, causan despolarización de la neurona motora superior, la señal continua hacia los ganglios basales, y luego de decusar a nivel de las pirámides, viaja a través del tracto corticoespinal a hacer sinapsis con la motoneurona inferior, y finalmente hacia la unión neuromuscular a través del nervio periférico.

Cada estímulo activa de 4-5% de las unidades motoras del músculo. El potencial de acción generado por la contracción muscular se puede medir a través de electrodos de registro, analizando su latencia y amplitud. Estos potenciales no se suelen promediar, dado el gran tamaño (relativo) del potencial producido por las fibras musculares estimuladas.³³

Todo lo anterior se da con una contracción muscular leve y desplazamiento articular escaso, limitando la interferencia total en la cirugía. Sin embargo, requieren igualmente de una suspensión transitoria del acto quirúrgico, para el aislamiento eléctrico del personal y evitar iatrogenia asociada al movimiento. El objetivo es repetidamente obtener PEM durante la cirugía, para comparar los valores de latencia y amplitud en distintos momentos, siendo significativos: la ausencia de PEM previamente evocables, una disminución del 60% de la amplitud, o un marcado aumento del umbral de estimulación requerido para obtener el PEM.³³

2.2.3 Electromiografía (EMG)

La electromiografía es el registro (visual y en este caso comúnmente auditivo), de la actividad eléctrica de los músculos. A través de agujas insertadas en el vientre muscular, se capta la generación de potenciales de fibras musculares inervadas por nervios periféricos que se forman de la raíz nerviosa del segmento medular correspondiente.³⁴ Los cambios que se registran son indicadores indirectos de la función e integridad de la vía nerviosa correspondiente. La señal se procesa por amplificadores de bajo ruido y se proyecta como señal visual de voltaje en el tiempo o se puede escuchar a través de un parlante. Los músculos para monitorizar se seleccionan de acuerdo con los miotomas de las raíces con mayor riesgo de compromiso.

En términos generales, en una persona sana, los músculos en reposo no deberían generar actividad eléctrica. Cuando se utiliza como prueba clínica diagnóstica, diferentes fenómenos neurológicos y musculares, variables en cuánto a la modalidad en que son evocados (voluntaria o involuntaria), a la cronicidad que presentan, y en la topografía en la que se observan, producen diversos patrones de actividad registrable y descrita ampliamente. De particular interés para el NMIO, cuando los axones y ganglios nerviosos son estimulados mecánicamente (o irritados eléctrica y químicamente), como en el caso de una compresión, elongación o tracción, se inducen descargas neurotónicas, caracterizadas por periodos largos (15-30 seg) de actividad de alta frecuencia.³⁴

2.2.4 Prueba de tornillos

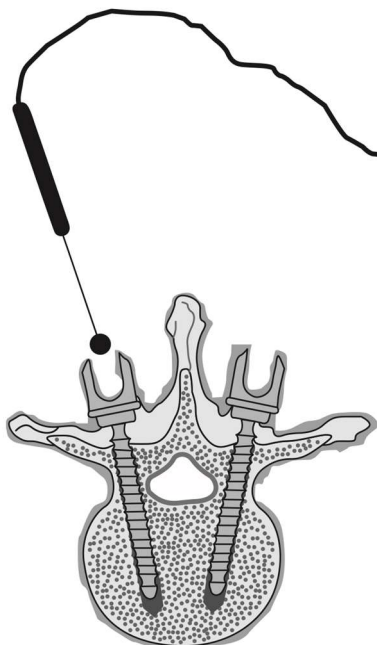


Figura 7. Prueba de tornillos. Tomado de Saavedra, M. y McLain, R.F. Cap 8.3 *Intraoperative neurophysiologic monitoring: surgeon's point of view.* En Farag, E., ed. *Anesthesia for Spine Surgery.* (2012)

Esta prueba neurofisiológica es propia del NMIO. Responde al hecho de que la colocación de los tornillos trans-pediculares se realiza normalmente por guía anatómica, y la visualización directa conlleva mayores riesgos iatrogénicos. Es una sub-modalidad de electromiografía evocada, en la que el cirujano utiliza un electrodo monopolar para estimular directamente una estructura, normalmente la parte expuesta de un tornillo pedicular (pero también raíces y nervios expuestos, o la pared ósea del pedículo), con intensidades de corriente eléctrica incrementales.³⁴ El propósito es encontrar el umbral de estimulación al que se observa registro de actividad en el músculo, ya que cuando este umbral se encuentra disminuido, es un posible indicador de mal posicionamiento del material quirúrgico.³⁴ Tiene una sensibilidad de hasta 93%, comparable con el 63% que se obtiene con fluoroscopia intraoperatoria, aunque la tasa en general de incidencia esta complicación es baja, se presenta en alrededor del 5% de las operaciones.³⁶

2.2.5 Ondas F - Reflejo H - Reflejo bulbocavernoso

Cuando la cirugía correctiva va a incluir los segmentos más distales de la columna, y especialmente si involucra fusión sacra o pélvica, existen otras ondas neurofisiológicas

valorables de manera complementaria.³⁴ Las ondas F son una respuesta motora tardía, producida cuando el estímulo sobre un nervio motor viaja desde distal hacia proximal, sobre el axón de la neurona motora inferior, llega al asta anterior de la médula, y se devuelve por el mismo axón hacia los electrodos de captación. Se pueden evocar en cualquier nervio motor. Son de menor amplitud y latencia prolongada respecto al potencial motor principal. Proporcionan información acerca del circuito de neurona motora inferior, especialmente de los segmentos proximales.³⁴ Se valoran las latencias, la persistencia y las diferencias entre lados.

El reflejo H es la correspondencia electrofisiológica del reflejo miotático. Los estímulos (normalmente descritos en gastrocnemios) directos (e indirectos por la contracción muscular) viajan a través de las neuronas sensitivas IA, hacia el asta posterior de la médula, activan de manera refleja y monosináptica las neuronas del asta anterior, y se propagan por el axón de la neurona motora inferior hasta producir una onda de potencial motor.³⁴ Son una manera de valorar la integridad de las porciones centrales de la médula y núcleos de la sustancia gris. Se valoran las amplitudes, latencias y diferencias entre lados. Tienen latencias muy similares a las ondas F, pero se pueden diferenciar por su persistencia y regularidad morfológica.³⁴

El reflejo bulbocavernoso es un franco reflejo medular sensitivo-motor, que se integra en los niveles sacros inferiores e involucra los nervios pudendos.³⁸ Los electrodos de estimulación se colocan sobre el dorso del pene (o sobre el clítoris), se realizan estímulos repetidos, que viajan por fibras sensitivas, se integran a nivel de médula y activan motoneuronas bilaterales que inervan el músculo del esfínter anal.³⁸ La prueba se limita a valorar únicamente los segmentos medulares en los cuales se integra el reflejo, normalmente más utilizado cuando hay compromiso de la cauda equina o cono medular, pero también incluye interneuronas que unen los hemisferios medulares. Se valoran la cantidad de potenciales generados y sus amplitudes.

2.2.6 Electroencefalografía (EEG)

La electroencefalografía (EEG) es la captación de la señal de actividad eléctrica de las neuronas corticales. Se considera la primera técnica descrita como parte del todo el espectro de neuromonitoreo intraoperatorio, y su mayor utilización es especialmente en cirugía que tiene alto riesgo de comprometer la perfusión cerebral, como procesos de cirugía carotídea. La técnica clásica utiliza 21 electrodos colocados en el cuero cabelludo de acuerdo con el sistema 10-20, con la señal digitalizada, pero sin modificar por medio de algoritmos para interpretación.⁴⁰

El sistema internacional 10-20 es un método internacionalmente reconocido para la colocación de electrodos en el cuero cabelludo. Fue inicialmente descrito para estandarizar la realización de la electroencefalografía, pero por su utilidad se ha adoptado en otros estudios.

Se dividen la longitud y ancho del cráneo en porcentajes, inicialmente 10%, luego 4 secciones de 20%, y otra final del 10%, y se forman líneas con denominaciones convencionales de FP, F, T, P, O y C, según el lóbulo cerebral que más cercanamente representan. Los electrodos sobre la línea central que recorre de nasion a isquion se sub-denomina Z o cero, los del hemicráneo derecho se numeran con números pares y los del lado izquierdo con números impares.⁴⁴

La línea C corresponde al surco central o surco de rolando, que es la delimitación entre la corteza motora primaria hacia anterior y la corteza sensitiva primaria hacia posterior, y es la zona que será de mayor interés en el NMIO, ya que serán los sitios principales de donde se evocan y de donde se registran los potenciales.⁴⁴

Específicamente cuando se trata del NMIO de cirugía correctiva de escoliosis, la utilidad principal de la electroencefalografía es ser un complemento a la monitorización de la profundidad de anestesia.²⁹ Sin embargo, el mismo concepto de la profundidad de anestesia no ha sido fácil de definir adecuadamente, por lo que estos métodos tienen sus limitaciones. Se utilizan montajes simplificados de menor cantidad de canales (normalmente cuatro), utilizando electrodos adicionales frontales, y las ondas son cuantitativamente analizadas y transformadas por computadores en valores fácilmente interpretables.⁴³ La valoración cuantitativa de EEG, que procesa la señal para producir un índice numérico sin dimensión entre 0 (sin actividad) y 100 (despierto) que correlaciona con la profundidad de anestesia, llamado el índice bi-espectral (BIS). Un valor entre 40-60 se considera el rango óptimo para cirugía. En la mayoría de los equipos comerciales de NMIO, se pueden valorar los trazos de los canales sin procesar, adonde se puede valorar la presencia del fenómeno de supresión de estallidos. A medida que se aumenta la profundidad de la anestesia, especialmente con medicamentos como el propofol, las ondas cerebrales disminuyen su frecuencia y se vuelven más lentas. Eventualmente, se comienzan a alternar períodos de inactividad con “estallidos” de actividad de baja frecuencia. La proporción entre el silencio eléctrico y la actividad se conoce como la razón de supresión de estallidos, y cuando aumenta, disminuye la excitabilidad cortical y la posibilidad de evocar y registrar potenciales.^{29,40}

2.3 Breve historia del NMIO

La historia del NMIO tiene sus orígenes con los estudios de bioelectricidad y electroneurofisiología en general. En 1870, Fritsch y Hitzig realizaban estimulaciones eléctricas en la corteza de perros para evocar respuesta motora en extremidades.³³ Valiéndose de las bases de los primeros experimentos a principio del siglo XX de Horsley y Foerster de estimulación cortical en humanos, el Dr. Penfield describe en 1937 el mapeo de las principales zonas corticales, en el transoperatorio, mediante estimulación directa. Durante ese mismo periodo, en 1949, se describe el uso de electrodos en la corteza expuesta para registrar actividad electroencefalográfica.⁴¹

Ya avanzando hacia la década de 1970, los Dres. Shimoji e Imai, en Japón, introducen en NMIO en cirugías de médula espinal, registrando potenciales tanto evocados como registrados directamente sobre la médula.⁴⁷ En 1973 el equipo del Dr. Stagnara, describe una técnica para valorar la integridad de las vías motoras. Consiste en disminuir la profundidad anestésica de inconsciencia al punto de despertar al paciente y solicitarle que movilice las extremidades inferiores, previo al cierre del campo operatorio. La prueba, que por un tiempo fue la modalidad de preferencia, ha caído en desuso en la actualidad. Tiene una adecuada sensibilidad para detectar déficit motor, y puede permitir la reversión del daño, pero conlleva altos riesgos anestésicos y quirúrgicos.⁴⁷ En 1974, el Dr. Nash comienza a llevar al registro de PESS, con una utilidad limitada por el ruido e interferencia eléctrica. En 1982 Grundy et al inician a describir los efectos individuales de distintos agentes anestésicos sobre los potenciales, y a encontrar técnicas para mejorar la obtención de los mismos, especialmente enfocándose en los PESS de baja latencia, que son los PESS utilizados hoy en día, y fueron por varios años la mejor prueba de la integridad de la médula. Simultáneamente, en estos años comienzan a entrar al mercado los primeros equipos comerciales, facilitando el uso de mayor cantidad de modalidades de monitoreo en más centros.⁴¹

En 1992 Hicks y Burke describen la técnica de evocar potenciales motores con estímulos eléctricos (PEMTtc), obteniendo mayor sensibilidad para las vías anterolaterales de médula, y mayor valor predictivo para la presencia de déficit motor postoperatorio. El uso de la técnica se vio limitado hasta 10 años después, que se obtiene aprobación por la FDA después de que MacDonald *et al* demostraran adecuada seguridad clínica.^{33,47}

Posterior a esto, los últimos 20 años han visto el esfuerzo de aumentar el cuerpo de evidencia relevante a las distintas modalidades, la ampliación de las utilidades asignadas a las mismas, y el refinamiento de los parámetros y alertas de los estudios realizados, que continúan hoy en día.³³ Si miramos al futuro, se puede esperar un papel progresivamente mayor de la tecnología en el NMIO. Se están comenzando a describir técnicas de inteligencia artificial para el análisis de las ondas registradas en el NMIO, para ser un apoyo más y acercarnos la certeza de que estamos obteniendo resultados adecuados.⁴²

2.4 Evidencia para NMIO en cirugía de escoliosis

En las últimas dos décadas, ha habido un aumento progresivo y muy marcado en la tendencia empírica de incluir el NMIO en las operaciones de escoliosis siempre que esté disponible. Independientemente del nivel de evidencia disponible, los estudios de opinión tanto de pacientes como de cirujanos indican que el uso del NMIO proporciona una tranquilidad en cuanto a la cirugía, pues da la sensación de seguridad, y hasta permite contemplar opciones y maniobras más complejas de manejo de la patología.³⁹ El uso del NMIO, desde sus comienzos, se apoya en razonamiento fisiopatológico y probabilístico y en una base amplia de experimentación animal.

Variablemente, en la literatura se refiere al NMIO como parte del *estándar de cuidado*, aunque existen autores que todavía disputan esta determinación.⁴⁶ Conforme cada una de las técnicas de monitoreo fue descrita, se ha construido un cuerpo robusto de evidencia en cuanto a sus propiedades como pruebas diagnósticas. Según los estudios de meta-análisis y revisión sistemática consultados, los PESS y los PEM, tanto por separado como formando parte de NMIO multimodal, tienen muy altas sensibilidad y especificidad, y tienen evidencia nivel I y recomendaciones clase A como métodos de detección de daño de médula espinal y predicción de déficit neurológico postoperatorio.^{39,45,46} Teniendo esto en mente, las preguntas clínicas más significativas son, entonces, acerca de la relación preventiva y terapéutica del NMIO como una intervención, es decir, el efecto que su uso tenga sobre desenlaces.⁴⁶ Actualmente la evidencia que existe es únicamente nivel III y IV, y no es suficiente para sugerir o negar la validez en este aspecto.^{39,45,46}

Existen importantes barreras, principalmente prácticas y éticas, para la formación de evidencia de alta calidad en esta dimensión. El diseño de un estudio aleatorizado, con adecuada potencia estadística, es técnicamente muy complejo.⁴⁵ Una de las primeras limitaciones es la falta de estandarización en cuánto a las indicaciones, modalidades, montajes, técnicas, criterios

de alarma, y respuestas a las mismas. Además, la baja tasa relativa de complicaciones neurológicas, en procedimientos que por su parte tampoco son comparativamente frecuentes, obligaría a altos números de pacientes en las muestras para obtener adecuado poder estadístico. Estos factores históricamente no han permitido adecuada homogenización retrospectiva de estudios existentes, o de la unión de varios centros en el diseño de estudios prospectivos.⁴⁶

Una consideración ética importante se hace presente cuando se considera la muy baja tasa y severidad de los efectos adversos de las técnicas de NMIO (cumpliendo el principio de *no-maleficencia*), frente a la severidad potencialmente devastadora de las complicaciones quirúrgicas neurológicas. Un estudio prospectivo aleatorizado del uso del NMIO, o de la respuesta ante sus alarmas, podría exponer a un paciente a una complicación por lo menos *potencialmente* prevenible, lo que dificulta mucho justificarlos, e inclusive ha presentado resistencia tanto de pacientes como de investigadores.³⁹

Capítulo 3: Guía práctica para neuromonitoreo intraoperatorio

Este capítulo constituye un resumen de los hallazgos e indicaciones de las principales guías basadas en evidencia consultadas, en cuanto a los aspectos prácticos y aplicados de las diferentes técnicas del NMIO.

3.1 Selección de Pacientes

El NMIO, en cada una de sus modalidades o en combinaciones de las mismas, tiene aplicaciones útiles en una amplia variedad de procedimientos que se pueden realizar sobre, o cerca del tejido nervioso. Desde las intervenciones a nivel encefálico, a las de ciertos pares craneales, la patología traumática u oncológica de médula espinal, a plexos y nervios periféricos, existen una o varias pruebas neurofisiológicas transoperatorias que pueden aportar información.²⁰

Como pauta general, no se considera que existan contraindicaciones absolutas para ninguna de las modalidades de NMIO sugeridas para la cirugía de corrección de escoliosis. Las contraindicaciones relativas existentes son escasas: en el caso particular de pacientes en los que se planea utilizar PEM para monitoreo, al tratarse de una estimulación cortical, la presencia previa de clips vasculares, electrodos intracraneales, marcapasos, e hipertensión endocraneal se consideran de riesgo (aunque muy bajo) y la utilidad del estudio debe estar demostrada para superar el riesgo. Igualmente, se ha descrito que, de manera sumamente infrecuente, los PEM (aplicados de maneras que no son las técnicas comunes en NMIO) pueden teóricamente desencadenar crisis convulsivas, por lo que una historia de epilepsia tiende a desfavorecer el uso de esta modalidad, la disminución de las intensidades de estimulación que se utilizan, o el incluir otras modalidades de monitoreo adicionales cuando esta se vaya a emplear.^{20,21}

La selección de pacientes, entonces, se encarga más bien de identificar aquellos que se vayan a someter a procedimientos que implican mayor riesgo de daño neurológico y en los que el NMIO pueda aportar mayor beneficio, y seleccionar para ellos los estudios más apropiados. La determinación especializada del equipo quirúrgico es clave, ya que, para efectos de este protocolo, el criterio de inclusión principal es que el paciente cumpla criterios quirúrgicos para cirugía correctiva de deformidad de columna, escoliosis idiopática o escoliosis degenerativa, independientemente de la técnica a utilizar o los niveles de columna involucrados. De manera similar, deben ser candidatos para manejo anestésico con anestesia total intravenosa (TIVA), de

tal manera que no haya interferencia farmacológica incompatible con el monitoreo, como suele darse con varios agentes anestésicos inhalados.

3.2 Planificación preoperatoria

3.2.1 Valoración del paciente

El profesional encargado de realizar el NMIO debe formar parte del equipo que valora al paciente previo a la intervención quirúrgica.²²

La valoración prequirúrgica multidisciplinaria en los pacientes que serán sometidos a cirugía espinal debe incluir.^{20,22,24,25}

- Diagnóstico adecuado: formado a partir del detallado entendimiento de la patología de fondo y su presentación clínica, además de la indicación quirúrgica actual.
 - Imágenes preoperatorias relevantes: radiografía simple AP y Lat columna, TAC, RMN, densitometría.
- Documentación minuciosa del estado médico y neurológico previo del paciente, con sus comorbilidades y tratamiento farmacológico actual.
 - Historia clínica y examen físico completo, incluido el examen neurológico detallado.
 - De especial relevancia para el NMIO: intervenciones quirúrgicas previas, material implantado, síntomas y signos neurológicos (convulsiones, debilidad, parestesias, dolor, incontinencia, espasmos) y su tiempo de evolución. Otros diagnósticos neurológicos asociados suelen ser relevantes para la interpretación de las pruebas del NMIO, incluyendo epilepsia, patología isquémica, neuropatías focales o generalizadas, e historia de TCE.
 - Historia de complicaciones quirúrgicas o anestésicas previas.
 - Valoración especializada del estado cardiopulmonar, con especial atención a la posibilidad de la existencia de trastornos restrictivos de la función pulmonar. EKG, pruebas de función pulmonar.
 - Análisis completo de laboratorio: Hemoleucograma, pruebas de coagulación, dímero-D, albúmina sérica, marcadores inflamatorios, grupo ABO y Rh.
 - Estratificación del riesgo anestésico.

- Cirugía propuesta: detalle del procedimiento quirúrgico a realizar, abordaje, distintas etapas, y posibles complicaciones.
- Consentimiento informado: una vez educado e informado el paciente, debe consentir al procedimiento en su totalidad, incluido el NMIO, con conocimiento pleno de los riesgos existentes de complicaciones.
 - Estos incluyen: quemaduras locales, lesiones por mordedura en labios y lengua, y dolor o sangrado local. Tienden a presentarse poco y ser leves.

Una vez que se cuente con estos elementos de la valoración preoperatoria, el profesional a cargo del NMIO puede realizar su planificación de estudios relevantes a realizar, determinando.^{20,24}

- La modalidad más apropiada, o más frecuentemente las modalidades varias a incluir en un abordaje multimodal.
- La topografía relevante (selección de músculos específicos y sitios de estimulación).
- La necesidad de realizar pruebas neurofisiológicas previas para constituir una base comparativa.
- Posibles limitaciones a las técnicas de NMIO o su utilidad diagnóstica identificadas.

3.2.2 Selección de modalidades de NMIO

Cuando se trata de cirugía correctiva de la columna vertebral, en el contexto de deformidad y en especial de escoliosis, existe el riesgo de causar daño, directo o indirecto, a la médula espinal, a las raíces nerviosas, a los plexos nerviosos y al nervio periférico. Las modalidades de NMIO que se seleccionen deben permitir la valoración de la función de estas estructuras.²⁵ Son cruciales los PESS y los PEM. La EMG continua y estimulada tienen importante utilidad. El reflejo H y bulbocavernoso pueden brindar información cuando están involucrados los segmentos más bajos de la columna. La EEG es un elemento opcional recomendado que monitoriza la profundidad del efecto anestésico y puede ser elemento de criterio en la valoración de anomalías transoperatorias.

Los potenciales evocados son el mecanismo principal por el cual se monitoriza la médula espinal. Los PESS valoran la transmisión aferente de potenciales periféricos a través de las columnas posteriores, con el beneficio de que se pueden obtener continuamente durante la cirugía sin causar interferencia. Requieren de promediación de cientos de potenciales, por lo que los efectos de una posible lesión no son inmediatamente apreciables. Por otro lado, los PEM evalúan las vías descendentes, predominantemente el tracto corticoespinal, mediante el disparo

de un estímulo cortical que desencadena potenciales musculares. No se evocan continuamente, la cirugía se debería pausar ya que causan cierto grado de movimiento, pero tiene muy alta sensibilidad y pueden detectar injuria tempranamente. Juntos, permiten mantener vigilancia estrecha de la integridad de una porción transversal significativa de la médula espinal. Son estudios fundamentales y necesarios para las cirugías de deformidad de columna.^{23,26}

La electromiografía (EMG), tanto continua como estimulada, es la modalidad de NMIO de preferencia para la detección de daño a las estructuras nerviosas periféricas, de especial importancia las raíces nerviosas. Dos electrodos de captación, colocados en cada uno de los músculos correspondientes a los miotomas de los segmentos de interés, pueden detectar actividad muscular espontánea, secundaria a irritación o directamente estimulada como método de identificación de estructuras.²⁶ En cirugías de columna lumbar con que se realizan mediante abordaje lateral trans-psoas, la EMG es parte integral y no opcional de la cirugía: está incluida como el método estándar de identificación de las estructuras del plexo lumbar que se deben evitar para no causar lesión neurológica.²⁶ Las cirugías que involucran la colocación de tornillos pediculares se benefician de un tipo particular de EMG, la prueba de tornillos, en la que se estimula en material quirúrgico de titanio, para observar el umbral de estimulación necesario para obtener respuesta muscular. Esta modalidad es altamente específica para brecha de pared medial de tornillos pediculares.²⁶

Cuando la cirugía propuesta involucra los segmentos más distales de la columna, la inclusión en el plan y montaje de pruebas del reflejo bulbocavernoso y el reflejo H pueden ser de utilidad. La verificación de la normalidad de estos reflejos al final de la cirugía puede confirmar la preservación de aferencias, interneuronas y eferencias en los niveles S1-S4.^{24,27}

Modalidad	Fortalezas	Debilidades
PESS	Puede ser continuo Muy específico Criterios bien establecidos por consenso Uso de parálisis Sin contraindicaciones	Requiere promediación Retraso relativo Baja sensibilidad vías distintas
PEMtc	Excelente sensibilidad déficit motor Menos sensible al ruido eléctrico Eje motor completo Evaluación inmediata Correlación fuerte a función motora postoperatoria	No es continuo Excluye uso de bloqueo neuromuscular Produce movimiento Muy sensibles a efectos anestésicos Riesgos teóricos de excitabilidad en epilepsia
EMG	Muy buena sensibilidad para daño radicular Retroalimentación continua *complementa PESS	Alta tasa falsos positivos Sensibilidad a cambios de temperatura Excluye uso bloqueo neuromuscular
Prueba Tornillos	Alta sensibilidad ruptura pedículo Guía en anatomía alterada, cirugía mínimamente invasiva Sencillez	Menos consenso en alarmas Produce falsos positivos Valora integridad ósea y de instrumentación (vs. neurológico directamente)

Tabla 1. Fortalezas y debilidades de las modalidades de NMIO recomendadas para cirugía de corrección de escoliosis. Traducido y modificado de Charalampidis, A., et al. The Use of Intraoperative Neurophysiological Monitoring in Spine Surgery. *Global Spine Journal.* (2020). PESS - potenciales evocados somatosensoriales. PEMtc - potenciales evocados motores eléctricos transcraneales. EMG - electromiografía continua.

La electroencefalografía (EEG) es una modalidad de NMIO que tiene indicaciones definidas en cirugías con claro riesgo de comprometer el flujo sanguíneo cerebral. La gran mayoría de casos en los que se utiliza, y de la evidencia publicada, es en endarterectomías carotídeas y procedimientos vasculares intracraneales.²⁸ En el caso de la cirugía de columna, es una modalidad adyuvante, que en la mayoría de las guías clínicas se considera opcional, pero recomendada. La utilidad en estas intervenciones radica en ser un elemento más de cuantificación de la profundidad anestésica, especialmente cuando se trata de TIVA, y ser sensible a cambios gruesos debidos a hipoperfusión/isquemia. Cuando se desea utilizar, se recomienda un montaje de EEG modificado y simplificado para esta aplicación.²⁹

3.3 Consideraciones anestésicas para NMIO

Los anestesiólogos son los miembros del equipo quirúrgico encargados del cuidado perioperatorio de las funciones vitales del paciente.⁴⁸ Para efectos de la intervención quirúrgica, la anestesia se vale del uso de fármacos para lograr los objetivos de adecuada analgesia, sedación, amnesia, y relajación muscular. Los medicamentos se administran durante las fases de pre-medicación (para control de la ansiedad), de inducción (que incluye parálisis para la intubación endotraqueal), la fase de mantenimiento de la anestesia, y al final de la cirugía, el despertar.⁴⁹

Estos conjuntos de fármacos ejercen efectos variables sobre muchos parámetros fisiológicos, incluyendo la presión arterial, el flujo sanguíneo y la perfusión cerebral, la tasa metabólica celular (neuronal), y la acción de los neurotransmisores. A su vez, los cambios en estos parámetros se pueden ver reflejada en la evocación y registro de los potenciales que se utilizan para monitoreo.⁴⁹

Los agentes inhalados son una clase de medicamentos volátiles muy frecuente y comúnmente utilizada en todo tipo de cirugías, y cuentan con una larga trayectoria de uso en el transoperatorio.⁵⁰ El reto que presentan en la cirugía correctiva de escoliosis es que son la clase de medicamentos anestésicos que afectan de manera más importante los registros del NMIO. Los gases halogenados, como por ejemplo el enflurano, sevoflurano y halotano, deprimen profundamente las amplitudes de los PESS y los PEM, frecuentemente eliminándolos por completo cuando se utilizan a dosis terapéuticas. Igualmente, el óxido nítrico ejerce un efecto supresor de los PESS al punto de ser considerado incompatible con su uso.⁴⁹ Por su versatilidad y la facilidad que los anestesiólogos tienen con su uso, existe siempre tendencia a intentar encontrar concentraciones alveolares medias (CAM) de agentes inhalados en las que todavía se puedan obtener potenciales,⁵⁰ pero la gran mayoría de guías recomienda evitar su uso, y en cambio, optar por esquemas de anestesia total intravenosa (TIVA).^{32,33,37,47,48,49}

3.3.1 TIVA

Los esquemas de TIVA, es decir, el uso únicamente de medicamentos que se puedan administrar parenteralmente, han demostrado ser eficaces y seguros en cumplir con los objetivos de la anestesia.^{49,50} Para la premedicación, el uso de benzodiazepinas es un método adecuado de producir sedación, ansiolisis y amnesia inicial. Aunque se conoce que las dosis altas y/o acumuladas de benzodiazepinas pueden interferir con las amplitudes de los PEM (a través de su

mecanismo de acción GABA-érgico), el uso de dosis bajas de benzodiazepinas de acción corta como el midazolam, es efectivo en obtener los efectos farmacológicos deseados y ejerce mínimo efecto sobre los potenciales.⁴⁹

Para la etapa de inducción, especialmente para la intubación endotraqueal, aún es necesario la parálisis mediante el bloqueo de la unión neuromuscular. Si se logra de manera efectiva el bloqueo, por definición no se pueden evocar los PEM, y la EMG no detectaría actividad neurogénica, aunque estuviera presente. Por estas razones, se recomienda el uso de un agente de bloqueo neuromuscular de acción corta, como la succinilcolina. Una vez asegurada la vía aérea, se puede dejar pasar el efecto paralítico. Se ha diseñado una prueba sencilla, conocida como tren de cuatro (TOF, por sus siglas en inglés), mediante la cual se disparan y registran cuatro estímulos periféricos en el antebrazo, valorando la cantidad de respuestas obtenidas (y su amplitud relativa a la primera). Cuando hay mínimo dos de cuatro (2/4) estímulos presentes, se considera viable el uso de PEM y EMG, pero la mayoría de las guías recomiendan que se realice cuando haya cuatro respuestas (4/4).^{33,49}

Los opioides, como el fentanilo y el remifentanilo, tienen un efecto de supresión cortical muy pequeño, que no impacta significativamente el NMIO. Son un pilar de la TIVA balanceada, ejerciendo efectos sinérgicos con los demás fármacos, minimizando respuestas autonómicas y brindando analgesia ante los insultos quirúrgicos. Las dosis de infusión utilizadas usualmente son de 0.2-0.9 ug/kg/min.⁴⁹

El propofol es el otro medicamento fundamental en los esquemas de TIVA. Es un hipnótico, que en las dosis usuales de infusión de 3-10 mg/kg/h, ejerce un pequeño grado de atenuación de los PESS y PEM, y de retraso en las latencias de los PESS, pero no llega a interferir clínicamente con el NMIO. Para esto, la dosis debe estar optimizada e individualizada para ser la mínima requerida, se desea que sea constante, y que, sobre todo, se eviten el uso de bolos de medicamento que puedan hacer fluctuar la profundidad de anestesia y los potenciales evocados. Tiene el beneficio adicional de ser fácilmente titulable por su duración de efecto corta. En el rango superior de la dosificación, puede llevar al patrón de EEG de supresión de estallidos, por lo que el uso del EEG como adyuvante en el monitoreo de la profundidad de anestesia se recomienda.⁴⁹

La ketamina y el etomidato son medicamentos adyuvantes que pueden disminuir la dosis necesaria de otros que se requiera administrar. En el contexto del NMIO, tienen un papel particular, ya que se ha descrito que tienden a aumentar la amplitud de los potenciales evocados a un mismo umbral, por lo que constituyen una alternativa terapéutica, de acuerdo con la evolución clínica intraoperatoria.⁴⁹

Fármaco	Etapa	Efecto sobre potenciales	Consideraciones
Benzodiacepinas	Pre-medicación	Disminución leve PESS, importante PEM	
Paralíticos (atracurio, succinilcolina)	Inducción	Abolición PEM, EMG	TOF
Opioides	I y M	Neutros	Analgesia, fentanilo tiende a disminuir movimiento.
Propofol	I y M	Dosis dependiente, disminuye PEM a dosis altas	Fácilmente titulable
Ketamina	I y M	Aumento de amplitud	
Etomidato	I y M		

Tabla 2. Efecto de los distintos fármacos anestésicos sobre los potenciales evocados. I y M - inducción y mantenimiento. PESS - potenciales evocados somatosensoriales. PEM - potenciales evocados motores. TOF - prueba de tren de cuatro, por sus siglas en inglés.

3.4 El profesional en NMIO

El campo médico-académico del NMIO se considera francamente de dominio sub-especializado. Las especialidades médicas de Neurología y Medicina Física y Rehabilitación son históricamente las que prevalecen en los laboratorios de neurofisiología clínica y tienen las bases de formación adecuada para la realización e interpretación de estudios de esta naturaleza. Existen programas de sub-especialización y de certificación en NMIO, la mayoría exigen dos años de experiencia clínica y al menos 200-300 estudios realizados bajo supervisión.^{31,32,33,51,52} Además, es una rama novedosa que se encuentra en desarrollo continuo, por lo que se requiere de actualización clínica constante. En cuanto a habilidades adicionales, se sugiere que los profesionales sean flexibles y dinámicos, dispuestos a trabajar en conjunto y cooperar con el resto del equipo de sala de operaciones. De igual manera, deben estar dispuestos a aprender y entender los conceptos e implicaciones del acto quirúrgico en el que van a aplicar el NMIO.⁵¹

Existen también a nivel mundial los profesionales con grado técnico en NMIO, quienes pueden realizar el montaje y estar presentes y visualizando el monitoreo, permitiendo a un médico supervisar hasta tres procesos simultáneos, inclusive de manera remota, con un grado aceptable de seguridad. Sin embargo, toda la literatura consultada coincide en que la *interpretación* del NMIO y sus hallazgos constituye un acto médico propiamente dicho, con las implicaciones profesionales éticas y legales que esto implica.⁵¹

3.5 Instrumentación

Con los avances tecnológicos de los últimos 20 años, se ha logrado la producción y distribución de equipos comerciales de NMIO de muy alta calidad, con amplificadores y filtros que permiten el adecuado funcionamiento en el contexto de las salas de operaciones modernas con mínima interferencia.⁵³ Igualmente, debe cumplir con los criterios de seguridad eléctrica para paciente, personal e infraestructura. No corresponde a esta guía recomendar un equipo comercial particular más allá que otros, siempre y cuando se cumplan las especificaciones técnicas mínimas necesarias para cada prueba, que se mencionan en las secciones siguientes.

Un equipo típico de NMIO gira alrededor de una computadora portátil, que en términos generales tenga la capacidad de estimular, captar, filtrar, amplificar, procesar, visualizar y almacenar, para todas las modalidades de estudio deseadas. Se pueden utilizar diferentes tipos de electrodos en un mismo procedimiento: de superficie, de aguja, y de espiral. Se fabrican de diferentes metales, la sugerencia es que se utilice el mismo para los electrodos de una determinada modalidad, y que se logran impedancias adecuadas. Se requieren suficientes canales de monitorización: un mínimo de ocho, pero idealmente de 16 a 32. Idealmente, el equipo debería contar con capacidad integrada de rechazo de artefacto, especialmente relacionado al electrocauterio.^{32,33,53} Adicionalmente, se puede requerir de una sonda de estimulación si se va a realizar la prueba de tornillos.

3.6 Montaje

La colocación de los electrodos en el paciente, al igual que el resto del montaje del equipo para NMIO, se realiza óptimamente en el momento después de la inducción de la anestesia, específicamente posterior a la intubación, pero previo al cambio de posición del paciente al decúbito prono. Esto permite evitar la percepción de dolor, o el movimiento por parte del paciente, pero permanecen las relaciones anatómicas fácil y convencionalmente ubicables.^{32,33}

Se recomienda el uso de una configuración inicial sistemática, organizada por colores, con correspondencia de canales, para limitar la confusión y facilitar la corrección de posibles factores técnicos. Es importante que los electrodos vayan identificados, sean colocados y fijados de una manera segura, que permita el cambio de posición, que tolere ciertas fuerzas de tracción y movimiento, y que no interfiera con otras necesidades de la operación (campo quirúrgico, accesos arteriales y periféricos, etc.).^{32,33} En ocasiones, puede ser necesario modificar la configuración o colocación de electrodos en las etapas iniciales del NMIO para intentar maximizar la señal obtenida. Igualmente, los montajes que se presentan a continuación corresponden a los puntos de partida, pero dada la variabilidad ampliamente observada y reportada en estos casos, no pueden ser excluyentes.

3.6.1 PESS

Estimulación³²

- Los electrodos de estimulación pueden ser de agujas, o de superficie. Las impedancias deben ser menores a 2 Kohm.
- Para miembros superiores, se estimula el nervio mediano. El ánodo se ubica entre los tendones del flexor radial del carpo y el palmar largo en el carpo y el cátodo 3cm proximal.
- Para miembros inferiores, se estimula el nervio tibial posterior. El ánodo posterior al maléolo medial, entre este y el tendón de Aquiles, y el cátodo 3cm proximal.

Captación³²

- Los electrodos de captación a nivel de cuero cabelludo se recomienda que sean de aguja en espiral. Las impedancias deben ser menores a 5 Kohm.
- Para miembros superiores los electrodos de captación pueden ubicarse clásicamente en Cp3/Cp4 o C3/C4 (captan el estímulo contralateral), con referencia al punto C o Cp contralateral (según sea el caso) o a Fz o Fpz.
- Para miembros inferiores el montaje inicial puede ser Cpz-Fpz, y se recomienda buscar diferentes configuraciones para encontrar la que arroja la señal más grande.

3.6.2 PEM

Estimulación^{33,44}

- Los electrodos de estimulación a nivel de cuero cabelludo se recomiendan que sean de aguja en espiral, con impedancias menores a 5 Kohm.
- Se colocan los electrodos de estimulación en C3/C4 o 1cm adelante de estos puntos. (cada uno actúa como la pareja polar del contralateral).

Captación^{33,44}

- Se utilizan electrodos de aguja introducidos en el vientre muscular (punto motor) con 1-2cm de separación.
- En miembros superiores típicamente se incluye el abductor corto del pulgar en la eminencia tenar.
- En miembros inferiores frecuentemente se incluyen el tibial anterior y el abductor del hallux, con músculos adicionales según las raíces en riesgo para determinado procedimiento, de acuerdo con la tabla 3.

3.6.3 EMG y Prueba de tornillos

Estimulación^{34,36,54}

- Para la prueba de tornillos se utiliza una sonda estimuladora colocada por el cirujano sobre la parte metálica expuesta del tornillo transpedicular.

Captación^{34,36,54}

- Solo se utilizan electrodos de captación, tipo aguja introducidos en el vientre muscular (punto motor) con 1-2cm de separación.
- En miembros superiores típicamente se incluye el abductor corto del pulgar en la eminencia tenar.
- En miembros inferiores frecuentemente se incluyen el tibial anterior y el abductor del hallux, con músculos adicionales que comprendan el miotoma en riesgo, según las raíces en riesgo para determinado procedimiento, de acuerdo con la tabla 3.

Raíz	Músculo
L1	Iliopsoas
L2	Recto Femoral
L3	Vasto Lateral

L4	Tibial Anterior
L5	Extensor halluc
S1	Gastrocnemio
S2	Bíceps Femoral
S3	Esfínter
S4	Esfínter

Tabla 3. Selección de músculos según raíz predominantemente representada. Modificado de Zouridakis, G., y Papanicolau, A.C, A Concise Guide to Intraoperative Monitoring. (2001)

3.7 Manejo transoperatorio

Una vez colocados los electrodos en su lugar, es pertinente verificar las impedancias de todos los mismos.

Dado que el montaje se realizó posterior a la inducción, corresponde verificar mediante el tren de cuatro (TOF) si aún hay efecto farmacológico de bloqueo neuromuscular. Se disparan cuatro pulsos de 0.2 ms de duración, separados por 500ms entre sí, con intensidad de 20-30 mA, sobre el nervio ulnar en el carpo de una extremidad, proximal al quinto dedo. Se registran los potenciales musculares en el aductor del pulgar, y se verifica la cantidad de estímulos que se reproducen. Un mínimo de 2/4 se necesita para determinar que está pasando el efecto del bloqueo neuromuscular, pero se recomienda esperar a que haya 4/4 respuestas para iniciar el monitoreo de los PEM y la EMG.⁵⁵

Una vez que se realiza el TOF, se deberían registrar potenciales basales para todas las modalidades en uso, previo al inicio del acto quirúrgico. Conforme avanza el tiempo bajo anestesia, se puede ver cierto grado de atenuación de los potenciales, por lo que los basales se deberían obtener tan cercano al momento de inicio de la cirugía propiamente como sea posible.

Durante todo el transoperatorio, es importante realizar anotaciones periódicas que incluyan la hora, tiempo quirúrgico transcurrido, signos vitales al corte, maniobras quirúrgicas realizadas, alertas que se hayan encontrado y capturas de pantalla de eventos neurofisiológicos relevantes.⁵¹

3.7.1 PESS

Los PESS se pueden obtener de manera periódica durante la cirugía, especialmente en los momentos en los que no está en uso el electrocauterio (ya que esta causa mucho artefacto). Las especificaciones técnicas recomendadas son:³²

- Filtros de bandas altas y bajas entre 30-3000 Hz (ajustables según basales)
- Filtros de escotadura o *notch* desactivados
- Estímulos de 10-30 mA (preferiblemente titulados según control motor mínimo)
- Frecuencia de 3-6 estímulos/seg (se ha observado que a frecuencias más altas se pierde la relación señal/ruido y se disminuyen las amplitudes).
- Promediación de 200-300 repeticiones.

3.7.2 PEM

Los PEM requieren de una pausa en el acto quirúrgico y causan leve movimiento en los pacientes por la contracción muscular, por lo que se deben evocar única y exclusivamente después de comunicar y obtener el visto bueno del cirujano. Son la modalidad que más rápidamente puede detectar cambios reversibles en médula espinal, por lo que se deberían evocar ante cualquier sospecha de deterioro, al igual que después de las maniobras quirúrgicas de riesgo (osteotomía, distracción, corrección), ante el reporte de eventos anestésicos o homeostáticos, o cuando exista la alteración de alguna otra modalidad de monitoreo³³.

Las especificaciones técnicas recomendadas son:^{33,44}

- Filtros de bandas altas y bajas de 10-5000 Hz
- Intensidad de estímulos normalmente entre 200-400V (con un límite sugerido de 1000V)
- Duración de estímulos de 0-3-2ms
- Frecuencia de estímulos de 4-5.1 Hz
- Trenes de 4-7 pulsos

3.7.3 EMG

La EMG puede permanecer con el registro de manera continua y debe ser observada o escuchada periódicamente. Especialmente en los momentos que ponen en riesgo las raíces nerviosas, así como durante todo el proceso de la colocación de tornillos pediculares.

Los parámetros técnicos son:³⁴

- Filtros de bandas altas y bajas de 3-10000 Hz
- Tiempos de barrido de 50 ms

- Sensibilidad de 50-100 mV

3.7.4 Prueba de tornillos

Después de la colocación de cada tornillo pedicular, según el criterio del cirujano, se puede realizar la prueba de tornillos. Mientras que el cirujano sostiene la sonda, el profesional de NMIO aumenta la intensidad del estímulo mientras observa la EMG para valorar la respuesta.

Los parámetros técnicos de los estímulos son: ^{34,36,54}

- Estímulos de 0.01 ms
- 1-2 Hz
- Iniciar con baja intensidad, alrededor de 5 mAmp e incrementar muy gradualmente, 1 mAmp a la vez.
- Registrar el umbral de estimulación al que aparece el potencial de acción muscular compuesto en el miotoma correspondiente.

3.8 Criterios de alarma

Por las razones expuestas previamente, en cuanto a la evidencia disponible y las limitaciones prácticas de diseñar estudios aleatorizados, especialmente en cuanto a los desenlaces más severos, los criterios de alarma o las alertas que se usan en el NMIO no corresponden a valores absolutos o normados, sino que son el resultado de observación, experimentación en los laboratorios y experiencia clínica, que paulatinamente se han ido consensuando. No existe una prueba “*gold standard*” contra la cual se puedan comparar estas intervenciones. La interpretación de estos criterios, el acto de identificar la señal auténtica y significativa dentro del potencial ruido presente en la información, es la parte más compleja y fundamental del NMIO.³⁹

Los criterios de alarma propuestos abajo constituyen posibles hallazgos a partir de los cuales el equipo interdisciplinario debería iniciar un proceso de solución de problemas en conjunto para llegar a determinar e interpretar su significancia. Se presentan a continuación.

3.8.1 PESS

Una disminución del 50% de la amplitud y/o un aumento del 10% de la latencia de un PESS es una alerta. Este ha sido el criterio clásico que se ha utilizado en el NMIO.^{32,56}

Recientemente, se ha propuesto utilizar un criterio más dinámico y adaptativo. Se trata de considerar la reproducibilidad (y variabilidad) previa de las ondas para establecer el porcentaje

de disminución que se toma como alerta. En una onda de PESS muy reproducible, que se ha venido obteniendo con muy poca variabilidad desde su basal (<20% de variabilidad), se podría considerar que una disminución de un 30% de su amplitud ya podría constituir una alerta. En ondas que tienen mayor grado basal de variabilidad, se utilizaría el criterio clásico. Estas modificaciones tienen una base fisiológica bien razonada, pero aún no han demostrado cambios significativos en los desenlaces respecto a los criterios previos.^{32,56}

3.8.2 PEM

La ausencia de potenciales musculares posterior a estímulos eléctricos transcraneales es una franca alerta.³³ Tiene muy alta correlación con déficit neurológico nuevo postoperatorio, especialmente cuando no revierte. Ante este hallazgo, se han intentado proponer otros criterios que se podrían presentar antes, en los que se sacrificaría una relación menos directa a cambio de mejores desenlaces. Es por esto que hay autores que proponen iniciar el proceso de alerta a partir de una disminución del 60% (también se ha descrito del 50-80%), aunque no hay consenso aún. En esa misma línea, después de pasado el efecto del “*desvanecimiento anestésico*” (20-30 min desde el inicio de la anestesia general), un aumento desproporcionado en el umbral de estimulación que se requiere para evocar los potenciales podría ser una alerta. Sin embargo, hay aún menos consenso en cuanto a este parámetro.³³

3.8.3 EMG

La electromiografía debería permanecer sin actividad mientras no existan estímulos. Sin embargo, muchos de los eventos que ocurren durante la cirugía pueden presentarse transitoriamente en el trazo de EMG sin tener ninguna significancia clínica. La tendencia de los cambios a persistir o recurrir en el tiempo va a ser el principal criterio para distinguir una alerta.^{31,34}

La presencia de descargas de alta frecuencia que continúen por más de 10 segundos, lvarias descargas secuenciales de morfología compleja, o espigas de alta amplitud que aparecen intermitentemente, son las alertas que pueden indicar irritación radicular.^{31,34} Adicionalmente, en ausencia de un artefacto grueso, la presencia de actividad en todos los músculos monitorizados puede indicar movimiento voluntario, que podría transmitir disminución de la profundidad anestésica.^{31,34}

3.8.4 Prueba de Tornillos

Un tornillo adecuadamente colocado en el cuerpo vertebral a través del pedículo puede tener un umbral de estimulación de hasta 40 mAmp. Sin embargo, normalmente se utiliza un umbral de 10 u 8 mAmp para tomar como alerta de ruptura de pedículo o mal posicionamiento del tornillo.^{34,54}

3.9 Causas de alteraciones

No todas las alteraciones de potenciales son alertas, y no todas las alertas observadas son secundarias a daño neurológico. Existen muchas otras causas que pueden producir cambios en los potenciales, y que hay que tomar en consideración cuando se inicia el abordaje de una alerta.^{28,31}

3.9.1 Técnicas

Las causas técnicas, de configuración y montaje, son las primeras que se deberían descartar y/o corregir ante una alerta. Todas las siguientes se encuentran descritas y reportadas:^{28,31}

- Desprendimiento de electrodos,
- Alteración accidental de parámetros técnicos en el equipo
- Desconexión de cables
- Interferencia eléctrica

3.9.2 Farmacológicas

Como se ha descrito antes, los medicamentos utilizados en la anestesia balanceada tienen efectos importantes sobre los potenciales evocados. Por lo tanto, entre las causas farmacológicas se encuentran:^{28,31}

- El cambio de plan anestésico no comunicado, con la utilización de agentes inhalados
- La administración de bolos de medicamentos intravenosos
- Persistencia del efecto a nueva administración de fármacos de bloqueo neuromuscular

3.9.3 Sistémicas

La alteración de los parámetros homeostáticos y los signos vitales pueden ser causas de una alarma, y al mismo tiempo poner en riesgo las funciones vitales del paciente.^{28,31}

- Disminución de la presión arterial por vasoplegia

- Disminución de la temperatura corporal
- Sangrado y pérdida de volumen circulante efectivo causando hipoperfusión
- Alteración metabólica como la hipoglicemia
- Alteración respiratoria
- Alteración del equilibrio ácido-base
- Posicionamiento de las extremidades que esté causando daño a estructuras periféricas como plexos.

3.9.4 Quirúrgicas

Las causas quirúrgicas son las directamente relacionadas con las intervenciones directas de los cirujanos.^{28,31}

- Compresión directa de alguna estructura, ya sea por material biológico (injertos óseos), material sintético (instrumentación o equipo quirúrgico), o el personal apoyando su peso corporal.
- El efecto de las maniobras quirúrgicas: la rotación, compresión, distracción o tensión de las estructuras anatómicas que comprometa su función.
- La irrigación ocasionalmente puede causar irritación de estructuras neurológicas.

3.10 Respuesta a alarmas

Cuando se ha identificado (o se está en duda de) uno de los criterios de alarma, el objetivo es verificar su presencia y en caso de ser posible corregir o revertirlo con la mayor prontitud posible. Para esto, un consenso de expertos ha desarrollado una herramienta, una lista de verificación o *checklist*, que se puede utilizar una o varias veces durante la cirugía en presencia de alertas.^{49,57,58}

El primer paso es verificar que el hallazgo no se debe a una anomalía técnica (normalmente alteraciones focales de señal) y que es reproducible. Si se cumplen estas condiciones, se debe informar al equipo interdisciplinario completo para iniciar la solución de problemas. Esto lleva a varias acciones simultáneas por miembros del equipo. En el momento del anuncio, la manipulación quirúrgica debería pausarse y se deberían verificar los signos vitales disponibles al corte, e iniciar el proceso de optimizar el estado homeostático.^{49,57,58}

El neurofisiólogo debe interpretar el patrón de los hallazgos para intentar determinar la causa más probable. Las alteraciones repentinas y caudales al nivel quirúrgico (con señales proximales conservadas) sugieren una causa quirúrgica, y orientarán a revertir las últimas

maniobras realizadas en orden inverso. Por otro lado, las alteraciones de señal que se dan a nivel global y de manera más paulatina tienden a sugerir causas sistémicas o farmacológicas y corresponde elevar la presión arterial a una presión arterial media PAM entre 90-100 mmHg, una hemoglobina mayor a 10 mg/dL, y la temperatura corporal mayor a 35° C. Si los cambios persisten, a pesar de las intervenciones, se debe considerar suspender la cirugía.

Estas recomendaciones se resumen en el *checklist* presentado en el anexo 1, traducido del trabajo de un consenso de expertos.^{49,57,58} El anexo 2 corresponde a un resumen gráfico de consulta rápida de la información contenida en este capítulo.

3.11 Consideraciones finales NMIO

Una vez concluida la manipulación y corrección de la columna y médula, se deben documentar nuevamente estímulos evocados finales.⁵¹

- El NMIO se detiene cuando se inicia el cierre por planos del campo quirúrgico.
- El profesional de NMIO deber verificar que se retiren los electrodos y que no se haya presentado ningún efecto adverso local.
- Se debe valorar al paciente una vez que ya esté despierto para realizar un examen neurológico postoperatorio detallado.
- Se emite un reporte neurofisiológico que debe incluir:
 - Datos de identificación del paciente
 - Participantes del equipo interdisciplinario
 - Intervención quirúrgica realizada
 - Modalidades de NMIO utilizadas
 - Documentación de respuestas basales
 - Detalles de cambios significativas
 - Presencia de alertas
 - Conductas en respuesta
 - Respuestas evocadas finales
 - Cambios neurológicos postoperatorios

Conclusiones

La cirugía para corregir deformidad de columna en escoliosis idiopática del adolescente y escoliosis degenerativa es cada vez más frecuente, y tiene riesgos inherentes de producir daño neurológico severo.

El neuromonitoreo intraoperatorio multimodal es una herramienta útil, de gran valor para la detección de alteraciones y predicción de complicaciones neurológicas postoperatorias en pacientes intervenidos por deformidad de columna, y se debería utilizar en todos los casos indicados que sea posible.

El neuromonitoreo intraoperatorio debe realizarse en el contexto de un equipo interdisciplinario, por personal calificado, con equipo adecuado y técnica estandarizada y correcta. Se proponen los parámetros con mayor respaldo para la realización

Se recomienda el uso de criterios de alarma multimodales, y el uso de una lista de verificación basada en evidencia y desarrollada por consenso de expertos para responder a la detección de los criterios de alarma.

Hay evidencia de alta calidad que sustenta el neuromonitoreo intraoperatorio como método diagnóstico y predictivo. Hace falta evidencia de alta calidad para sustentar el uso de diversas modalidades de neuromonitoreo intraoperatorio para como herramienta en el proceso de modificar los desenlaces postoperatorios.

Referencias bibliográficas

1. Romero-Muñoz, L.M., et al. Neurological injury as a complication of spinal surgery: incidence, risk factors, and prognosis. *Spinal Cord*. (2020). 58: 318–323. doi:10.1038/s41393-019-0367-0
2. Safaee, M.M., Ames, C.P. y Smith, J.S. Epidemiology and Socioeconomic Trends in Adult Spinal Deformity Care, *Neurosurgery*. (2020). 87(1): 25–32. doi:10.1093/neuros/nyz454
3. Ravindra V.M., et al. Degenerative Lumbar Spine Disease: Estimating Global Incidence and Worldwide Volume. *Global Spine Journal*. (2018). 8(8):784-794. doi:10.1177/2192568218770769
4. Zygorakis, C.C, et al. Analysis of National Rates, Cost, and Sources of Cost Variation in Adult Spinal Deformity, *Neurosurgery* (2018). 82(3): 378–387. doi:10.1093/neuros/nyx218
5. Bican O., Minagar A., Pruitt A. The Spinal Cord A Review of Functional Neuroanatomy. *Neurological Clinics*. (2013). 31(1): 1-18. doi: 10.1016/j.ncl.2012.09.009
6. Cho, T.A. Spinal Cord Functional Anatomy. *CONTINUUM: Lifelong Learning in Neurology* (2015). 21: 13–35. doi:10.1212/01.CON.0000461082.25876.4a
7. Miele V., Panjabi M., Benzel E. Anatomy and biomechanics of the spinal column and cord. *Handbook of Clinical Neurology*. (2012). 109: 31-43. doi:10.1016/B978-0-444-52137-8.00002-4
8. Morita, D., et al. Range of motion of thoracic spine in sagittal plane. *European Spine Journal*. (2014). 23(3): 673–678. doi:10.1007/s00586-013-3088-7
9. Bible, J.E., et al. Normal Functional Range of Motion of the Lumbar Spine During 15 Activities of Daily Living. *Journal of Spinal Disorders & Techniques*. (2010). 23(2): 106–112. doi:10.1097/bsd.0b013e3181981823
10. Serrano-Barrenechea, L. Escoliosis Idiopática del Adolescente: Manejo Conservador. Guía de Práctica Clínica. Reus, España (2008). 3-28.
11. Alvares García de Quesas, L.I, y Nunez Giralda, A. Escoliosis idiopática. *Revista Pediátrica de Atención Primaria*. (2011). 13 (49): 135-146.
12. Maruyama T, Takeshita K. Surgical treatment of scoliosis: a review of techniques currently applied. *Scoliosis*. (2008). 3(6). doi:10.1186/1748-7161-3-6.
13. Aebi, M. The Adult Scoliosis. *European Spine Journal*. (2005). 14: 925–948 doi:10.1007/s00586-005-1053-9
14. Buchowski, J.M. Adult Scoliosis: Etiology and Classification. *Seminars in Spine Surgery*. (2009). 21(1): 2–6. doi:10.1053/j.semss.2008.12.001

15. Cho KJ, Kim YT, Shin SH, Suk SI. Surgical treatment of adult degenerative scoliosis. *Asian Spine Journal*. (2014). 8(3): 371-381. doi:10.4184/asj.2014.8.3.371
16. Maruyama, T, y Takeshita, Katsushi. Surgical treatment of scoliosis, a review of techniques currently applied. *Scoliosis*. (2008). 3(6): 101-106. doi:10.1186/174807161-3-6
17. Hamilton, D.K., et al. Rates of new neurological deficit associated with spine surgery based on 108,419 procedures. *Spine*. (2011). 36(15): 1218-1228. doi:10.1097/brs.0b013e3181ec
18. Barha, C.K., et al. Basics of neuroanatomy and neurophysiology. *Handbook of Clinical Neurology*. (2016). 138(3): 53–68. doi:10.1016/B978-0-12-802973-2.00004-5
19. Zouridakis, G., y Papanicolau, A.C. Cap. 2. Neurophysiological Background. En Zouridakis, G., y Papanicolau, A.C, A Concise Guide to Intraoperative Monitoring. (2001). CRC Press. 9-18.
20. Galloway, G.M. Cap. 2. The Preoperative Assessment. En Galloway, G.M.et al. Intraoperative Neurophysiologic Monitoring. (2010).Cambridge University Press, Estados Unidos. 10-18.
- 21 MacDonald, D.B. Safety of intraoperative transcranial electrical stimulation motor evoked potential monitoring. *Journal of Clinical Neurophysiology*. (2002). 19(5): 416-429. doi:10.1097/00004691-200210000-00005.
22. Gabriel N. Friedman MD , et al. Multidisciplinary Approaches to Complication Reduction in Complex Spine Surgery: A Systematic Review. *The Spine Journal* (2020). 20(8): 1249-1260. doi:10.1016/j.spinee.2020.04.008
23. Charalampidis, A., et al. The Use of Intraoperative Neurophysiological Monitoring in Spine Surgery. *Global Spine Journal*. (2020). 10(15): 104S-114S. doi:10.1177/2192568219859314
24. Stecker MM. A review of intraoperative monitoring for spinal surgery. *Surgical Neurology International*. (2012). 3: 174-187. doi:10.4103/2152-7806.98579
25. MacDonald, D.B., Al-Enazi, M., y Al-Zayed, Z. Cap. 7. Vertebral Column Surgery. En Husain, A., editor. A Practical Approach to Neurophysiologic Intraoperative Monitoring. (2008). Demos, Nueva York. 95-116
26. Beckman, J.M., y Uribe, J.S. Cap. 278. Electrophysiologic Studies and Monitoring. En Winn, H., et al. Youman's and Winn Neurological Surgery. (2016). 7ma ed. SPringer
27. Imirizaldu, L, et al. Monitorización Neurofisiológica Intraoperatoria en Cirugía de Columna. *Anales Sistemas Sanitario de Navarra*. (2009). 32(3).

28. Kim, S-M., et al. Intraoperative Neurophysiologic Monitoring: Basic Principles and Recent Update. *Journal of Korean Medical Sciences*. (2013). 28: 1261-1269.
29. Jameson, L.C., y Sloan, T.B. Using EEG to monitor anesthesia drug effects during surgery. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. (2006). 20(6): 445–472. doi:10.1007/s10877-006-9044-x
30. Lall, RR. et al. Intraoperative neurophysiological monitoring in spine surgery: indications, efficacy, and role of the preoperative checklist. *Neurosurgical Focus*. (2012). 33(5): E10. doi:10.3171/2012.9.FOCUS12235
31. Biscevic, M., Sehic, A., y Krupic, F. Intraoperative neuromonitoring in spine deformity surgery: modalities, advantages, limitations, medicolegal issues - surgeon's views. *Efort Open Reviews*. (2020). 5(1): 9-16. doi.:10/1302/2058-5241.5.180032
32. MacDonald, D.B., et al. Recommendations of the International Society of Intraoperative Neurophysiology for intraoperative somatosensory evoked potentials. *Clinical Neurophysiology*. (2018). 103(4): 927-943. doi:10.1016/j.clinph.2018.10.00
33. MacDonald, D.B., et al. Intraoperative motor evoked potential monitoring - A position statement by the America Society of Neurophysiological Monitoring. (2013). 124(3): 2291-2316. doi:10.1016/j.clinph.2013.07.025
34. Leppanen, R. Intraoperative monitoring of segmental spinal nerve root function with free-run and electrically-triggered electromyography and spinal cord function with reflexes and F-responses: A position statement by The American Society of Neurophysiological Monitoring. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. (2005). 19: 437-461. doi:10.1007/s10877-005-0086-2
35. Al-Mohrej, O.A., et al. Surgical treatment of adolescent idiopathic scoliosis: Complications. *Annals of Medicine Surgery*. (2020). 52(4): 19-23. doi:10.1016/j.amsu.2020.02.004
36. Maguire J., et al. Evaluation of intrapedicular screw position using intraoperative evoked electromyography. *Spine*. (1995). 20(9): 1068–1074. doi:10.1097/00007632-199505000-00015
37. Saavedra, M. y McLain, R.F. Cap 8.3 Intraoperative neurophysiologic monitoring: surgeon's point of view. En Farag, E., ed. *Anesthesia for Spine Surgery*. (2012). Cambridge University Press. Londres, Reino Unido. 113-256.
38. Rodi, Z y Vodusek, D. Intraoperative monitoring of the bulbocavernosus reflex: the method and its problems. *Clinical Neurophysiology*. (2001). 112(2): 879-883. doi:10.1016/s1388-2457(01)00500-4

39. Howic, J., et al. Foundations for evidence-based intraoperative neurophysiological monitoring. *Clinical Neurophysiology*. (2015). 126(5). doi:10.1016/j.clinph.2015.05.033
40. Isley, M.R., et al. Guidelines for intraoperative neuromonitoring using raw (analog or digital waveforms) and quantitative electroencephalography: A position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. (2009). 23: 369-390. doi:10.1007/s10877-009-91
41. Nuwer, M.R. Cap. 1 Introduction, history and staffing for intraoperative monitoring. En Galloway, G.M. et al. *Intraoperative Neurophysiologic Monitoring*. (2010). Cambridge University Press, Estados Unidos. 1-9.
42. Kortus, T., et al. Automated robust interpretation of intraoperative electrophysiological signals - a Bayesian Deep-Learning approach. (2021). *Current Directions in Biomedical Engineering*. 7(2): 69-72. Doi: 10.1515.cdbme-2021-2018
43. Fahy, B.G. y Chau, D.F. The technology of processed electroencephalogram monitoring devices for assessment of depth of anesthesia. *Anesthesia and Analgesia*. (2017). 1-7.
44. Szelenyi, A., Kothbauer, K.F., y Deletis, V. Transcranial electric stimulation for intraoperative motor evoked potential monitoring: Stimulation parameters and electrode montages. *Clinical Neurophysiology*. (2007). 118(3): 1586-1595. doi:10.1016/j.clinph.2007.04.008
45. Nuwer, M.R., et al. Evidence-based guidelines update: Intraoperative spinal monitoring with somatosensory and transcranial motor evoked potentials. *Neurology*. (2012). 78: 585-589.
46. Hadley, M.N., et al. Guidelines for the use of electrophysiological monitoring for surgery of the human spinal column and spinal cord. *Neurosurgery*. (2017). 81(5): 713-732.
47. Buhl, L., et al. Neurophysiologic intraoperative monitoring for spine surgery: A practical guide from past to present. *Journal of Intensive Care Medicine*. (2020). 13(3): 1-13. doi:10.1177/0885066620962453
48. Frost, E.A.M. Cap1. Preoperative assessment of the adult patient. En Farag, E., ed. *Anesthesia for Spine Surgery*. (2012). Cambridge University Press. Londres, Reino Unido. 1-24.
49. Sahinovic, M.M. et al. Anesthesia and intraoperative neurophysiological spinal cord monitoring. *Current opinion in Anaesthesiology*. (2021). 34(5): 590-596. doi:10.1097/ACO.0000000000001044
50. Royan, N., et al. The influence of anaesthesia on intraoperative neuromonitoring changes in high-risk spinal surgery. *Journal of Neuroanaesthesiology and Critical Care*. (2017). 4: 159-166. doi:10.4103/jnacc.jnacc_10_17

51. Gertsch, J., et al. Practice guidelines for the supervising professional: intraoperative neurophysiological monitoring. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*. (2019). 33(2): 175-183. doi:10.1007/s10877-018-0201-9
52. Toleikis, J.R., et al. Intraoperative monitoring using somatosensory evoked potentials: A position statement by the American Society of Neurophysiological Monitoring. (2010). Publicado por American Society of Neurophysiological Monitoring.
53. Zamel, K.M. Cap 4. The operating room environment and team approach, pitfalls and technical factors. En Galloway, G.M.et al. Intraoperative Neurophysiologic Monitoring. (2010). Cambridge University Press, Estados Unidos. 33-41.
54. Galloway, G.M. Cap. 10. Pedicle screw application and electromyographic recording. En Galloway, G.M.et al. Intraoperative Neurophysiologic Monitoring. (2010).Cambridge University Press, Estados Unidos. 101-108.
55. Mena, N., y Sorrick, L. Monitoreo neurofisiológico intraoperatorio: Utilidad y ventajas en cirugía de columna. *Revista Ecuatoriana de Neurología*. (2013). 22(1-3): 85-91.
56. Nuwer, M.R. New alert criteria for intraoperative somatosensory evoked potential. *Clinical Neurophysiology*. (2018). 129: 2-3. doi:10.1016/j.linph.2018.11.002
57. Ziewacz, J., et al. The design, development, and implementation of a checklist for intraoperative neuromonitoring changes. *Neurosurgical Focus*. (2012). 33(5): E11-E21. doi:10.3171/2012.9.focus12263
58. Vitale, M.G., et al. Best practices in intraoperative neuromonitoring in spine deformity surgery: development of an intraoperative checklist to optimize response. *Spine Deformity*. (2014). 2(5): 333-339. doi:10.1016/j.jspd/2015/05/003

Anexo 1

Checklist

Lista de verificación ante criterios de alarma NMIO

Traducid de Ziewacz, J., et al. The design, development, and implementation of a checklist for intraoperative neuromonitoring changes. *Neurosurgical Focus*. (2012).

Neurofisiólogo:

- Informar cambios al cirujano
- Repetir pruebas para verificar resultados
- Descartar factores técnicos y de montaje
- Valorar patrón de cambios
 - Aislado
 - Asimétrico
 - Generalizado
- Cuantificar mejoría

Cirujano:

- Detener manipulación actual
- Valorar campo quirúrgico por compresiones
 - (Material, hueso, hematoma, posición)
 - Descomprimir
- Considerar revertir maniobras

Anestesiólogo:

- Verificar cambios en plan farmacológico
- Verificar uso de bloqueo NM
 - TOF
- Valorar profundidad anestésica
 - PA, FR, FC, BIS
- PAM a 90-100 mmHg
- Hb/Hcto 10mg/dL
- Temperatura
- Disminuir grado anestesia
 - Eliminar agentes inhalados
 - Reducir infusión propofol
 - Administrar Ketamina

Ante cambios persistentes:

- PAM >100 mmHg
- Valorar Test despertar PRN
- Valorar riesgo/ben. de s/s procedimiento

Anexo 2

Resumen gráfico de consulta rápida NMIO

