

Resonancia magnética de la columna pediátrica

A. Jay Khanna, MD, Bruce A. Wasserman, MD y Paul D. Sponseller, MD

Resumen

La resonancia magnética es un método excelente para el estudio por imágenes de la columna pediátrica. Para utilizarla con éxito, es necesario entender tanto sus principios físicos básicos como los protocolos de sedación necesarios para adquirir imágenes de alta resolución. La interpretación de las imágenes con precisión requiere apreciar las diferencias entre la anatomía normal de la columna del niño y del adulto. El estudio de estas imágenes requiere una cierta familiaridad con el diagnóstico diferencial de las enfermedades de la columna infantil, incluyendo los procesos más frecuentes (infecciones, neoplasias y traumatismos) así como el disrafismo espinal. A pesar de la reconocida utilidad de la resonancia magnética de la columna pediátrica, siguen existiendo controversias sobre su seguridad en este grupo de pacientes y sus limitaciones en el diagnóstico y la evaluación de la escoliosis y el síndrome de la médula trabada.

J Am Acad Orthop Surg (Ed Esp) 2003;2:292-303

J Am Acad Orthop Surg 2003;11:248-259

La resonancia magnética es un método excelente para el estudio por imágenes de los procesos patológicos de la columna pediátrica. Proporciona imágenes de alta resolución no sólo de las estructuras óseas (incluyendo el cuerpo vertebral, el canal medular y los elementos posteriores) sino también de las partes blandas (incluyendo la médula espinal, el disco intervertebral y las raíces nerviosas). La resonancia magnética (RM) puede mostrar estas estructuras en varios planos utilizando diferentes secuencias de pulsos que permiten una caracterización de los tejidos en y alrededor de la columna infantil. Las indicaciones de RM en los niños (menores de 18 años) se están expandiendo gradualmente a medida que la tecnología mejora. La interpretación adecuada de las imágenes de RM en este grupo de edad requiere entender el aspecto en la RM de la columna pediátrica normal en las diferentes fases del desarrollo. En patologías como el disrafismo espinal, las curvas torácicas izquierdas y la escoliosis juvenil, existen recomendaciones específicas que pueden ayudar a los clínicos a utilizar la RM con eficacia.

Técnicas de RM

Los factores que principalmente influyen en el aspecto en la RM de los diferentes tejidos son la densidad de protones en cada tejido, el entorno químico de los protones y la potencia del campo magnético de la resonancia. A diferencia de la tomografía axial computarizada (TAC), que produce imágenes que dependen de la densidad de los diferentes tejidos, la RM produce imágenes en función del contenido de agua libre y otras propiedades magnéticas del agua, lo que proporciona un mayor contraste de las partes blandas.

Se pueden obtener secuencias diferentes variando la intensidad de los pulsos de radiofrecuencia (RF), el intervalo entre pulsos, el tiempo de repetición (TR) y el tiempo de eco (TE), es decir, el tiempo transcurrido entre la aplicación del pulso de RF y la determinación de la señal emitida por el paciente. Manipulando estas variables, las imágenes pueden potenciarse para resaltar las características de un tejido en T1, T2, gradiente de eco o densidad protónica. Las imágenes potenciadas en T1 permiten estudiar los detalles anatómicos, incluyendo

las estructuras óseas, el disco y las partes blandas. Las imágenes potenciadas en T2 se utilizan fundamentalmente para estudiar la médula espinal y reforzar ciertas lesiones difíciles de detectar. Las secuencias de eco de gradiente típicamente se utilizan cuando son necesarias imágenes axiales, como en el estudio de la estenosis foraminal de la columna cervical, porque su adquisición de imágenes permite obtener secciones muy finas.

Las secuencias de pulsos estándar en la valoración de la columna son las imágenes potenciadas en T1 con eco de giro (*spin echo*) y las imágenes potenciadas en T2 con eco de giro rápido (*fast spin echo* o FSE). La técnica de FSE permite la adquisición de imágenes sin prolongar los tiempos de imagen. Como el líquido cefalorraquídeo (LCR) aparece brillante en las imágenes potenciadas en T2 y la médula espinal retiene su señal intermedia, las imágenes consiguen un contraste máximo entre el LCR y los tejidos neurales, lo que permite una delimitación óptima de la médula espinal y las raíces nerviosas. Las imágenes potenciadas en T2 son muy sensibles a los cambios patológicos tisulares, incluyendo cualquier proceso en el que se produzca aumento del contenido en agua de la matriz extracelular. Estos cambios patológicos habitualmente aparecen en las imágenes potenciadas en T2 como aumentos de señal.

El Dr. Khanna es Chief Resident, Department of Orthopaedic Surgery, The Johns Hopkins Hospital, Baltimore, MD. El Dr. Wasserman es Assistant Professor, Department of Radiology, The Johns Hopkins Hospital. El Dr. Sponseller es Professor y ViceChairman, Department of Orthopaedic Surgery, The Johns Hopkins Hospital.

Copyright 2003 by the American Academy of Orthopaedic Surgeons.

La señal procedente de la grasa puede suprimirse mediante una variedad de técnicas, como la saturación química de su señal o la aplicación de un pulso de inversión, así como la obtención de imágenes con un tiempo de inversión (TI) corto cuando no hay señal procedente de la grasa (recuperación de tiempo de inversión corto o *short TI recovery* [STIR]). La supresión química habitualmente se utiliza en secuencias que producen señal elevada en la grasa, como las imágenes potenciadas en T2 con FSE o las imágenes en T1 poscontraste. La supresión de grasa ofrece poco valor en las imágenes potenciadas en T1 sin contraste, porque la señal procedente de la mayor parte de las lesiones patológicas, independientemente de que sean inflamatorias neoplásicas o tumorales, suele ser baja y se visualiza mejor gracias al contraste con la señal brillante de la grasa adyacente. La supresión de la grasa de las imágenes potenciadas en T1 poscontraste del cuerpo vertebral es útil en los adultos que presentan degeneración grasa de la médula ósea. Las imágenes con supresión de grasa pueden ser especialmente útiles para estudiar las lesiones ligamentosas o que afecten a los tejidos paravertebrales. La utilidad de las imágenes STIR es más limitada debido a que los parámetros de las imágenes están restringidos y no pueden optimizarse para conseguir un contraste máximo entre los tejidos adyacentes de interés.

Las imágenes con eco de gradiente parecen imágenes potenciadas en T2, porque el LCR es relativamente brillante; sin embargo, las lesiones paraneurales suelen ser más difíciles de detectar en las imágenes en T2 con FSE. Las secuencias con eco de gradiente son sensibles a la falta de homogeneidad local en el campo magnético, y la pérdida de señal se ve exagerada en presencia de este tipo de heterogeneidad. La heterogeneidad del campo puede deberse a la presencia de implantes metálicos (p. ej., tornillos pediculares o barras paravertebrales), a diferencias en las susceptibilidades magnéticas de tejidos adyacentes (como la interfaz aire-tejido) y a sustancias paramagnéticas (como el gadolinio). Los productos de metabolización de la sangre oca-

sionan distorsiones del campo local que producen pérdida de señal, lo que hace que esta técnica sea muy sensible para la detección de sangre.

Los sistemas de RM abierta están siendo utilizados con mayor frecuencia, especialmente en el caso de los niños. Estos sistemas poseen campos mucho menos potentes que los sistemas cerrados, y por lo tanto suelen dar lugar a estudios de calidad global inferior, especialmente en la columna. Sin embargo, los sistemas de RM abierta permiten un mejor acceso a los pacientes bajo sedación o con otras dificultades. Los pacientes más jóvenes y aquéllos con claustrofobia tienen acceso a sus padres y al medio ambiente, lo que hace que el procedimiento sea menos intimidatorio. Sin embargo, siempre que sea posible la RM de la columna debe realizarse utilizando sistemas cerrados de 1.5 T.

Protocolos de sedación pediátrica

Para realizar correctamente una RM es a menudo necesaria la sedación de los niños más pequeños. Existen muchos estudios que han analizado protocolos específicos de sedación.^{1,2} La *American Academy of Pediatrics* (AAP) ha publicado sus recomendaciones para la sedación programada de los pacientes pediátricos,^{3,4} pero el cumplimiento de estas recomendaciones no es obligatorio. La AAP afirma que se necesita una cuidadosa evaluación y personal médico experimentado para identificar aquellos pacientes con riesgo elevado de hipoxia que pueda suponer una amenaza para la vida.⁴ Además, de acuerdo con las recomendaciones de la AAP, es necesario controlar a los pacientes para detectar y tratar de forma precoz la hipoxia que pueda poner en peligro la vida.³ La AAP recomienda que antes de realizar una exploración bajo sedación, los niños desde la edad de recién nacido hasta los tres años no deben haber ingerido nada por vía oral durante 4 horas, y aquéllos con edades comprendidas entre los 3 y los 6 años no deben haber ingerido nada por vía oral durante 6 horas.⁴

Los protocolos de sedación pediátrica varían, pero existen unos cuantos fármacos que se incluyen en la mayoría de ellos. En los niños pequeños de menos de 18 meses, con frecuencia se recomienda el hidrato de cloral. Sin embargo, su utilización es controvertida, porque presenta una absorción variable, efectos paradójicos y no existen criterios establecidos para las dosis. Los niños más mayores habitualmente son tratados con fenobarbital intravenoso asociado o no a fentanilo.

Aunque existen estudios en los que se ha comunicado la administración con éxito de sedantes por personal de enfermería entrenado,^{1,2} la experiencia de un anestesista puede ser muy beneficiosa en el caso de pacientes con comorbilidades importantes, como los procesos cardiopulmonares, las displasias esqueléticas, las enfermedades neuromusculares y las alteraciones anatómicas de las vías respiratorias. Debido a los riesgos potenciales de la anestesia y la sedación en niños, existe una tendencia a enviar a los niños que requieren sedación a hospitales que cuenten con anestesistas pediátricos.

Una consideración importante después de la sedación para la realización de una RM infantil es la necesidad de cumplir estrictamente con criterios establecidos de alta, entre los que se encuentran la recuperación de los signos vitales basales y la capacidad de mantener las vías respiratorias no obstruidas.⁵ Debido a los riesgos inherentes a la sedación, se han desarrollado técnicas alternativas, como la privación de sueño y las técnicas de exploración segmentaria rápida. Esta última técnica permite la adquisición de imágenes de elevada calidad sin utilizar sedación.

Anatomía normal en RM

El conocimiento de la anatomía normal en RM (fig. 1) resulta esencial para entender y predecir el aspecto en la RM de los procesos patológicos.⁶

Adolescentes y adultos

La columna lumbar se estudia con mayor frecuencia que la columna cervical y torácica, tanto en niños como en adultos. En los adolescentes y los

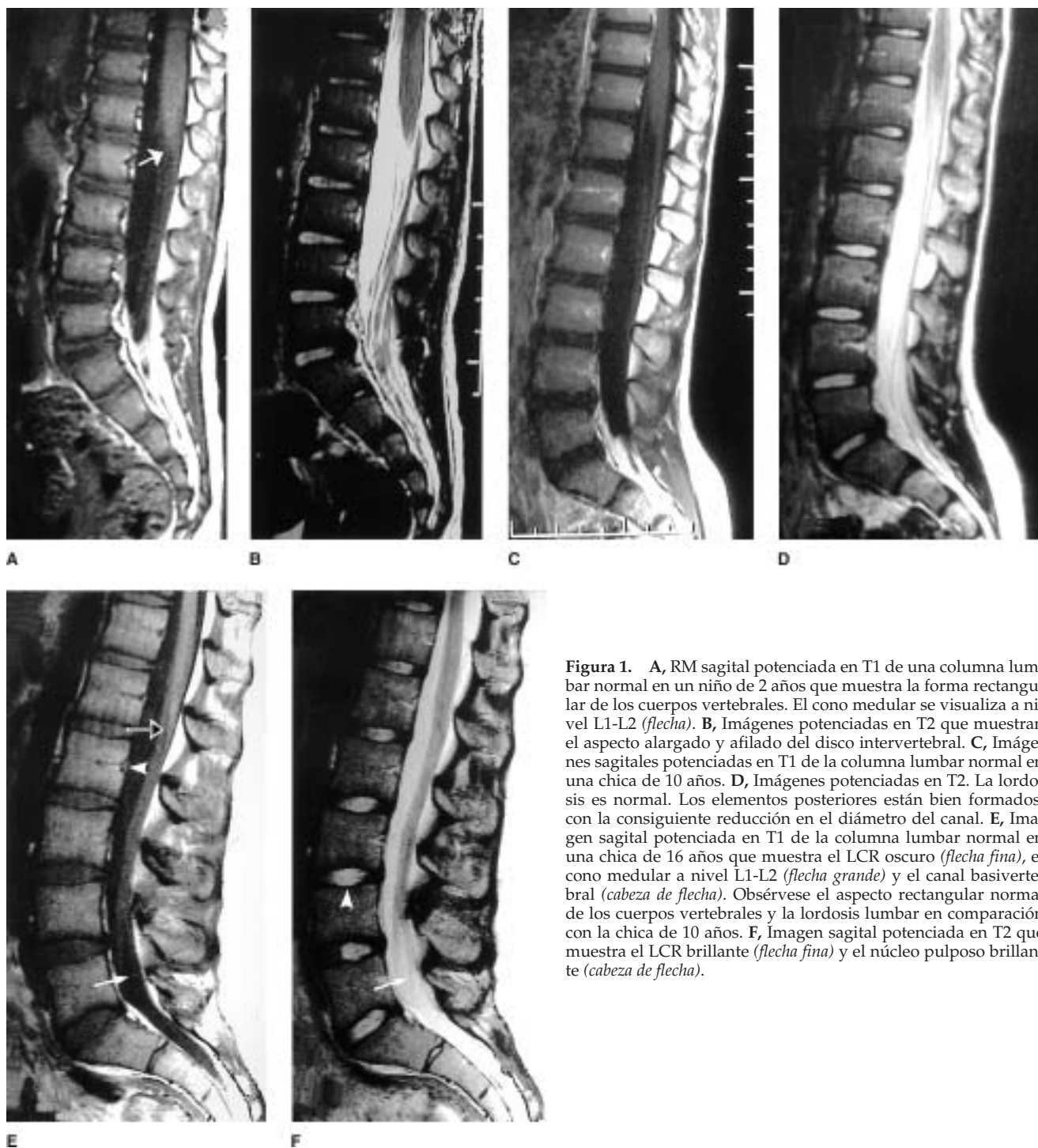


Figura 1. A, RM sagital potenciada en T1 de una columna lumbar normal en un niño de 2 años que muestra la forma rectangular de los cuerpos vertebrales. El cono medular se visualiza a nivel L1-L2 (*flecha*). B, Imágenes potenciadas en T2 que muestran el aspecto alargado y afilado del disco intervertebral. C, Imágenes sagitales potenciadas en T1 de la columna lumbar normal en una chica de 10 años. D, Imágenes potenciadas en T2. La lordosis es normal. Los elementos posteriores están bien formados, con la consiguiente reducción en el diámetro del canal. E, Imagen sagital potenciada en T1 de la columna lumbar normal en una chica de 16 años que muestra el LCR oscuro (*flecha fina*), el cono medular a nivel L1-L2 (*flecha grande*) y el canal basivertebral (*cabeza de flecha*). Obsérvese el aspecto rectangular normal de los cuerpos vertebrales y la lordosis lumbar en comparación con la chica de 10 años. F, Imagen sagital potenciada en T2 que muestra el LCR brillante (*flecha fina*) y el núcleo pulposo brillante (*cabeza de flecha*).

adultos, el canal medular lumbar es redondeado proximalmente y triangular distalmente. Las articulaciones facetarias lumbares, que se visualizan mejor en el plano axial, están cubiertas con una capa de cartílago hialino

de 2 a 4 mm de espesor. Este cartílago puede visualizarse bien en las secuencias con FSE y eco de gradiente. El espacio epidural y los ligamentos también deben estudiarse cuidadosamente. La grasa epidural aparece hi-

perintensa en las imágenes potenciadas en T1; el ligamento amarillo muestra una señal ligeramente superior en T1 en comparación con los ligamentos restantes. El cono medular habitualmente se localiza a nivel L1-

L2. Las raíces nerviosas que cruzan pasan distalmente desde el cono medular y se extienden en sentido anterior y lateral, saliendo lateralmente por debajo del pedículo y extendiéndose al foramen neural. El disco intervertebral, formado por las plataformas vertebrales cartilaginosas, el anulus fibroso y el núcleo pulposus, suele presentar un aumento de señal en su porción central en las imágenes potenciadas en T2. El LCR, que se aprecia bien en las secuencias T1 como hipointenso y en las secuencias T2 como hiperintenso, con frecuencia puede utilizarse para determinar el tipo de secuencia de pulso que estamos analizando. Los latidos del LCR a menudo crean artefactos que degradan la imagen en la columna lumbar; estos artefactos no deben confundirse con procesos patológicos.

La columna cervical presenta una leve lordosis en las imágenes sagitales. En los cortes axiales, el canal medular es triangular con su base situada en la parte anterior. Puede apreciarse una banda densa en la base de la apófisis odontoides que representa una variante normal por persistencia de la sincondrosis subodontoidea, no debiendo confundirse con una fractura. En los adultos, las articulaciones facetarias son pequeñas y triangulares, mientras que en los niños son de mayor tamaño y planas. La médula espinal tiene una sección elíptica a nivel cervical. Existen diferencias entre la señal de las sustancias gris y blanca normales de la médula espinal. Esta heterogeneidad de señal no debe confundirse con patología intramedular. Los discos intervertebrales tienen un aspecto parecido a los de los niveles torácico y lumbar, aunque de menor tamaño. Una característica anatómica importante de la columna cervical es el prominente plexo venoso epidural, que no está presente en las regiones torácica o lumbar.

Los cuerpos vertebrales torácicos tienen un tamaño relativamente constante, y el canal medular es prácticamente redondo. Existe abundante grasa epidural en la zona posterior, pero menos que en la región lumbosacra en la zona anterior. La médula es más redondeada que a nivel cervical o lumbar, y cada segmento medular se

sitúa entre dos y tres niveles por encima de su homónimo vertebral. Los discos intervertebrales son más finos que los discos lumbares. El aspecto del LCR es más variable en la columna torácica que en la región lumbar, debido a la mayor intensidad de los latidos del LCR, pero en las imágenes potenciadas en T1, con frecuencia se aprecia como una región de baja señal por detrás de la médula espinal. Estos artefactos son más intensos en los ápices de las curvas, incluyendo el ápice de la cifosis torácica. Existen ciertas técnicas que pueden reducir este artefacto, como por ejemplo, sincronizar la captación de imágenes con el pulso o con el ciclo cardíaco.

Niños

Diferencias entre la columna pediátrica y la del adulto

El aspecto en RM de la columna en crecimiento es complejo. Se producen cambios sustanciales en los centros de osificación vertebral y en los discos intervertebrales, lo que modifica el aspecto global de la columna de forma marcada, especialmente entre la infancia y la edad de dos años.⁷ En general, los centros de osificación vertebral están osificados de forma incompleta al principio de la infancia, y los discos son más gruesos y tienen mayor contenido hídrico que en los adultos. El canal medular y los orificios de conjunción son de mayor tamaño y existe una menor curvatura. Además, en la columna pediátrica, en la del adolescente y en la del adulto joven, la intensidad global de señal en los cuerpos vertebrales es menor que en la columna del adulto en las imágenes potenciadas en T1, debido a la abundancia en los primeros de médula roja (hematopoyética) en comparación con la médula amarilla (grasa).

Recién nacido a término

En el recién nacido, el tamaño global de los cuerpos vertebrales es pequeño en relación con el canal medular, y la médula espinal termina aproximadamente en L2. La columna lumbar no presenta la lordosis habitual y es recta. Los cuerpos vertebrales presentan en T1 una señal marcadamente poco intensa, con una ban-

da central hiperintensa fina que probablemente represente el plexo basivertebral. El hueso esponjoso de los centros de osificación es elipsoidal en lugar de rectangular y con frecuencia se confunde con los discos. El disco intervertebral es relativamente estrecho y a menudo contiene una banda central fina y brillante en T2 que representa los restos de la notocorda.^{6,7}

Tres meses de edad

A los tres meses de edad el componente óseo del cuerpo vertebral ha aumentado y la cantidad de cartílago hialino se ha reducido, lo que les da a los cuerpos vertebrales un aspecto rectangular. Los centros de osificación comienzan a ganar intensidad de señal, iniciándose en las plataformas vertebrales y progresando en sentido central. Los orificios de conjunción no han cambiado sustancialmente a esta edad, y permanecen relativamente grandes y ovoideos.^{6,7}

Dos años de edad

A los dos años de edad, la columna ha comenzado a mostrar su alineación sagital normal, probablemente como consecuencia del inicio de la carga (fig. 1, A y B). La porción osificada del cuerpo vertebral aumenta de forma importante y comienza a asumir el aspecto que tendrá en el adulto, con una osificación casi completa de los pedículos y los procesos articulares. El espacio discal y el núcleo pulposus se han reducido de tamaño y con frecuencia son difíciles de identificar. El orificio de conjunción también comienza a presentar su aspecto de adulto a medida que su porción más inferior se estrecha.⁷

Diez años de edad

A los diez años de edad, la alineación sagital recuerda a la del adulto (fig. 1, C y D). La osificación de los cuerpos vertebrales y los elementos posteriores es prácticamente completa, con la consiguiente reducción del diámetro del canal medular. Los cuerpos vertebrales también desarrollan sus contornos cóncavos superior e inferior. El núcleo pulposus se hace más pequeño a esta edad y ocupa aproximadamente la mitad del espacio discal en el plano sagital. Los ori-

ficios de conjunción continúan estrechándose en su parte inferior.⁶

El cono medular

En las primeras fases de la vida fetal, la médula espinal se extiende hasta el aspecto inferior de la columna vertebral ósea.⁶ Debido al crecimiento longitudinal más rápido de los cuerpos vertebrales en comparación con la médula espinal, al nacimiento, el cono medular se ha situado en la columna lumbar alta. Es importante apreciar la localización del cono medular en toda RM de la columna pediátrica (fig. 1, A y E). El hallazgo de que el cono medular se encuentra por debajo del espacio L2-L3 en un niño de más de cinco años es anormal e indicativo de posible médula trabada.^{8,9} Saifuddin y cols.¹⁰ revisaron los hallazgos en RM de 504 columnas de adulto normales y encontraron que la posición media del cono medular es el tercio inferior de L1 (rango, tercio medio de T12 a tercio superior de L3).

Procesos patológicos de la columna pediátrica

Infección

Los procesos infecciosos que afectan a la columna pediátrica son la osteomielitis, la discitis y los abscesos epidurales y paraespinales.¹¹⁻¹³ En general, las características de la señal en RM cuando existe una infección son reducción de la señal en T1 y aumento en T2 tanto en hueso como en partes blandas.

La RM es más sensible que las radiografías convencionales o la TAC, y más específica que la gammagrafía para identificar osteomielitis vertebral.^{14,15} Puede detectarse edema medular en imágenes potenciadas en T2 precontraste, con supresión grasa y FSE. El refuerzo del disco y de los cuerpos vertebrales adyacentes en imágenes potenciadas en T1 con supresión grasa tras la administración de gadolinio ayuda a confirmar el diagnóstico. La especificidad de la RM para la infección es mayor en los niños que en los adultos, porque uno de los principales motivos de confusión, la espondiloartrosis degenerativa, no forma parte del diagnóstico diferencial. Un dilema frecuente es

distinguir la osteomielitis de neoplasias; en general, los procesos infecciosos son más proclives a cruzar y destruir los discos intervertebrales que los procesos neoplásicos.

La discitis se aprecia como una interrupción de los límites entre disco y vértebra, normalmente bien definidos en las imágenes potenciadas en T1, y como un aumento de la señal discal en las imágenes potenciadas en T2.¹² En las imágenes en T2, la discitis puede obliterar la hendidura horizontal que normalmente se aprecia en el interior del disco intervertebral. La señal anormal que se aprecia en la discitis infecciosa se asocia clásicamente con inflamación de las partes blandas circundantes y cambios reactivos en las plataformas vertebrales. La discitis primaria es más típica de los niños que de los adultos, debido a la mayor vascularización discal. La discitis secundaria a discografía o cirugía es más frecuente en los adultos.

Los abscesos epidurales son poco frecuentes, pero cuando se producen suelen ser consecuencia de una intervención u osteomielitis vertebral. Los abscesos epidurales se diagnostican cuando en las imágenes de RM se aprecia una colección epidural y las circunstancias clínicas son las apropiadas.¹¹ Las imágenes potenciadas en T1 tras la administración de gadolinio con frecuencia muestran un borde periférico de refuerzo que representa la pared del absceso.

Los abscesos paravertebrales se producen junto a la columna espinal, y lo más frecuente es que se desarrollen en la musculatura paravertebral. Pueden ser secundarios a una infección primaria en la columna o producirse espontáneamente en la musculatura paravertebral. Estos abscesos pueden apreciarse como abscesos retrofaríngeos en la columna cervical, abscesos paraespinosos o retromediastínicos en la columna torácica o abscesos de psoas en la columna lumbar. Las características en RM de los abscesos paravertebrales son una pared bien definida y refuerzo periférico con gadolinio en las imágenes potenciadas en T1.

Traumatismos

La RM puede utilizarse para valorar a las víctimas de traumatismos en

la columna pediátrica que presenten una exploración neurológica anormal o estén inconscientes. Inicialmente el paciente se evalúa utilizando radiografías simples, que pueden ser normales. Aunque la TAC permite una mejor evaluación de los detalles óseos y de las fracturas desplazadas, la RM proporciona mejores imágenes para el estudio de fracturas no desplazadas debido a su capacidad para detectar cambios en la señal de la médula ósea.

Las lesiones de la médula espinal sin alteraciones radiológicas (*spinal cord injury without radiographic abnormality* [SCIWORA]) constituyen una entidad bien definida que afecta al grupo de edad pediátrico.^{16,17} La hiper movilidad y laxitud ligamentosa características de la columna cervical y torácica pediátrica predisponen a los niños a este tipo de lesiones.¹⁶ La elasticidad de la columna ósea pediátrica y el tamaño relativamente grande de la cabeza permiten que las estructuras musculoesqueléticas se deformen más allá de sus límites fisiológicos, lo que produce una lesión traumática de la médula y a continuación una reducción espontánea de la columna.¹⁶

Como ocurre en otros tipos de lesiones de la médula espinal, el factor predictivo más importante del resultado es la gravedad de la lesión neurológica. Un paciente con un déficit neurológico completo después de una lesión tipo SCIWORA presenta muy mal pronóstico en términos de recuperación de la función neurológica. El papel de la RM en el síndrome SCIWORA es definir la localización y el grado de lesión neurológica, descartar fracturas ocultas y subluxaciones que puedan requerir intervención quirúrgica, y descartar la presencia de lesiones ligamentosas. Las imágenes potenciadas en T2 generalmente muestran un aumento de señal en la médula espinal, cuerpos vertebrales o ligamentos. El aumento de señal medular en T2 es compatible con edema y puede representar desde una contusión parcial reversible a una sección completa de la médula.

Existen otras dos entidades traumáticas que pueden producirse en los niños, generalmente como resultado de su participación en los deportes. La primera lesión es una hernia de disco

aguda. Suele tratarse de una fractura con un desplazamiento en forma de bisagra del fibrocartilago con deslizamiento de la totalidad del disco y la plataforma vertebral fracturada, en lugar de tratarse de extrusión de un fragmento discal del núcleo, como ocurre en los adultos.¹⁸ Estas fracturas por avulsión suelen no apreciarse en las radiografías convencionales y se detectan mejor con TAC o RM.¹⁸ Las imágenes axiales en RM muestran el fragmento fracturado como una zona con señal de baja intensidad que sobresale al canal medular, y las imágenes sagitales muestran una región de señal hipointensa en forma de Y o de 7 en todas las secuencias.¹⁸

La segunda entidad es la espondilolisis, causa de dolor lumbar en deportistas jóvenes. La RM, sin embargo, no es la técnica de imagen óptima para estudiar la espondilolisis. La TAC ofrece una mayor resolución espacial y la capacidad de definir con precisión el defecto óseo, mientras que la gammagrafía puede mostrar aumento de captación del trazador en la región del defecto.

Neoplasias

La RM es la técnica de elección para el estudio de neoplasias en y alrededor de la columna pediátrica.¹⁹ Una forma eficaz y frecuentemente utilizada para clasificar la lesión es distinguir lesiones extradurales, intradurales-extramedulares (fig. 2) o intradurales-intramedulares (fig. 3). Con este sistema de clasificación anatómica, el papel principal de la RM es

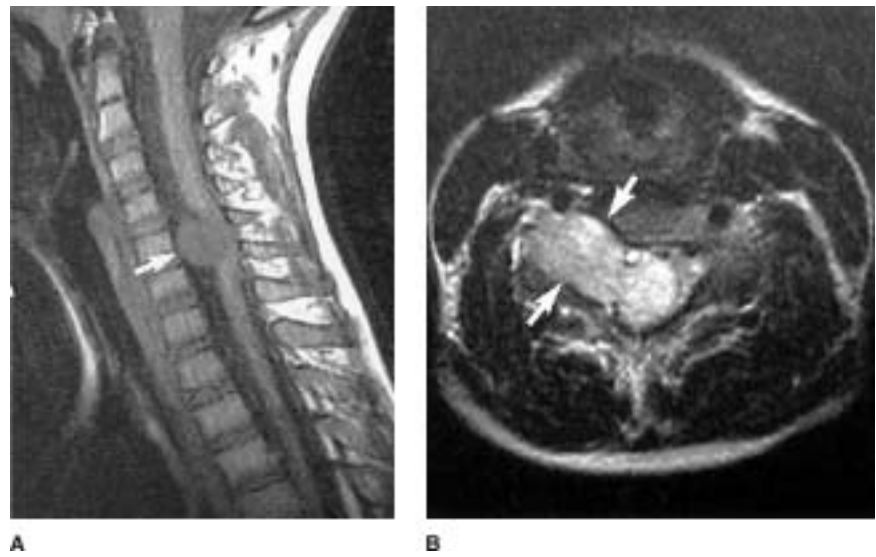


Figura 2. Schwannoma en un niño de 8 años. **A**, RM sagital potenciada en T1 que muestra una masa intradural-extramedular que presiona sobre la parte anterior de la médula cervical a nivel C5 (flecha). **B**, Imagen axial en T2 que muestra cómo la lesión se hernia a través de agujero de conjunción C5-C6 (flechas).

definir la localización de la neoplasia que se sospecha, lo que se consigue mejor utilizando imágenes sagitales y axiales potenciadas en T1 y T2. Una vez que la lesión se ha clasificado, las imágenes potenciadas en T2 pueden utilizarse para caracterizar mejor la lesión. En concreto, pueden determinarse el grado de edema e infiltración tisular circundante y la presencia o ausencia de un componente quístico. A continuación, las imágenes contenidas tras la administración de gadolinio pueden compararse con imágenes

en T1 sin contraste. El paso final en la elaboración del diagnóstico es la correlación de los hallazgos en las imágenes con la edad del paciente y otros criterios que permitan afinar el diagnóstico diferencial.

Disrafismo espinal

El término disrafismo espinal es un término general que se utiliza para describir un amplio rango de alteraciones debidas a la fusión incom-

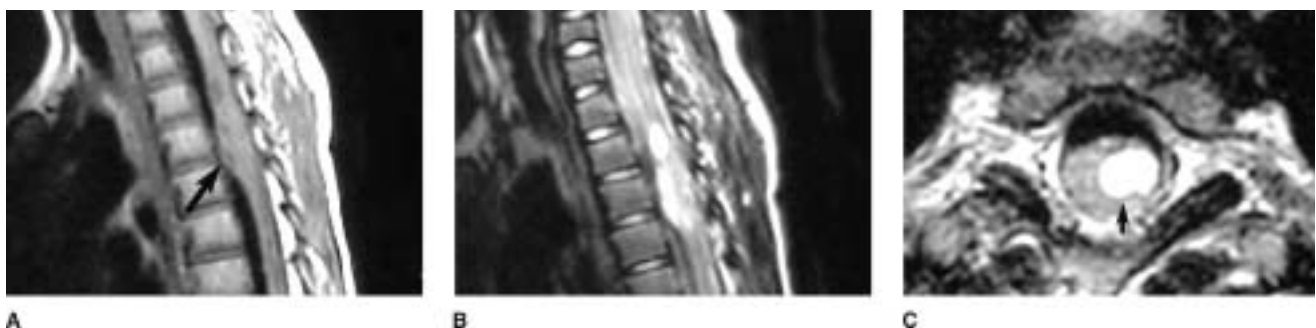


Figura 3. Astrocitoma en un niño de 6 años. **A**, RM sagital potenciada en T1 que muestra una lesión intradural-intramedular en el interior de la médula espinal en los niveles T3 a T5 (flecha). **B**, Imagen sagital en T2 que muestra la naturaleza parcialmente quística de la lesión. **C**, Imagen axial en T2 que confirma que la lesión (flecha) está en el centro de la médula espinal.

Tabla 1
Clasificación del disrafismo espinal

Categoría	Tipos
Masa en la espalda no cubierta con piel	Mielomeningocele Mielocele
Masa en la espalda cubierta con piel	Lipomielomeningocele Mielocistocele
Ausencia de masa en la espalda (oculta)	Meningocele posterior simple Diastematomielia Sinus dérmico dorsal Lipoma intradural <i>Filum terminale</i> tenso Meningocele sacro anterior Meningocele torácico lateral Hidromielia Síndrome de la notocorda dividida Síndrome de regresión caudal

Adaptado con autorización de Byrd SE, Darling CF, McLone DG, Tomita T: MR imaging of the pediatric spine. *Magn Reson Imaging Clin North Am* 1996;4:797-833.

pleta en la línea media de estructuras mesenquimales, hueso y elementos neurales. Las alteraciones óseas son defectos en el arco neural con ausencia parcial o completa de las apófisis espinosas, las láminas u otros componentes de los elementos posteriores. Se ha demostrado que la RM es la mejor modalidad para evaluar el disrafismo espinal.^{20,21}

Se ha propuesto un sistema de clasificación para el estudio de los pacien-

tes en los que se sospecha disrafismo espinal (tabla 1).²¹ El diagnóstico diferencial puede reducirse a uno de los siguientes tres tipos: disrafismo espinal con una masa en la espalda cubierta o no con piel o ausencia de masa en la espalda. El diagnóstico final se realiza en función de los hallazgos de la RM.

El mielomeningocele es la forma más habitual de disrafismo espinal (fig. 4). Generalmente se presenta como una lesión en la espalda no cu-

bierta con piel que suele asentar en la región lumbosacra (aunque puede producirse en niveles más altos). La masa puede o no estar cubierta con leptomeninges que contienen una cantidad variable de tejido neural. El saco se hernia a través de un defecto en los elementos posteriores de la columna. La médula espinal generalmente contiene una hendidura dorsal abierta y con frecuencia está trabada en el interior del saco.²¹ Se produce escoliosis progresiva en el 66% de los pacientes con mielomeningocele, malformación de Arnold-Chiari tipo II en el 90 al 99%, diastematomielia en el 30 al 40% y siringohidromielia en el 40 al 80%.²² Puede producirse tejido cicatricial en la zona de cierre quirúrgico del saco, de forma que es importante seguir a estos pacientes por si desarrollan síntomas y signos de síndrome de la médula trabada.

De las afecciones que se presentan con una masa en la espalda con cobertura cutánea en presencia de disrafismo espinal, el lipomeningocele es la lesión más frecuente.^{6,21} El lipomeningocele está formado por tejido lipomatoso en continuidad con el tejido subcutáneo de la espalda y también se insinúa a través del defecto disráfico y la dura hacia el interior del canal medular. La médula espinal con frecuencia presenta un defecto dorsal allí donde se encuentra el tejido lipomatoso y puede estar trabada a este nivel. La ca-



Figura 4. Mielomeningocele en una niña de 6 años. **A,** RM sagital potenciada en T1 que muestra una masa en la parte baja de la espalda junto a los contenidos del canal medular (flechas). **B,** Imagen potenciada en T2 que muestra cómo la masa está llena de líquido hiperintenso, compatible con LCR (flecha). **C,** Imagen axial en T1 que confirma que la masa comunica con el canal medular a través de un defecto en los elementos posteriores (flechas).



Figura 5. Cavityad siringomiélica de gran tamaño que afecta la totalidad de la columna en un niño de dos años. **A**, RM sagital potenciada en T1 que muestra cómo la cavityad tiene un tamaño máximo al nivel de la columna torácica baja (*flechas*). Imágenes axiales en T1 (**B**) y T2 (**C**) que confirman la localización de la cavityad en el centro de la médula espinal.

racterística fundamental de la RM en esta lesión es que el tejido lipomatoso está en continuidad con las características de señal de la grasa subcutánea en todas las secuencias, incluidas aquéllas con supresión grasa.

El disrafismo espinal oculto se presenta sin masa en la espalda. La diastematomielia se caracteriza por

una división sagital de la médula espinal, el cono medular o el filum terminal en dos segmentos, con frecuencia en la columna torácica o lumbar. El tubo dural y la aracnoides no están divididos en aproximadamente la mitad de los pacientes; no suelen existir alteraciones clínicas y no está indicado el tratamiento qui-

rúrgico. En los demás pacientes, el tubo dural y la aracnoides sí están divididos total o parcialmente en la zona de división de la médula espinal, lo que traba la médula y ocasiona los consiguientes síntomas. Las imágenes coronales en T1 y T2 son las que mejor definen la división sagital de la médula; estos hallazgos

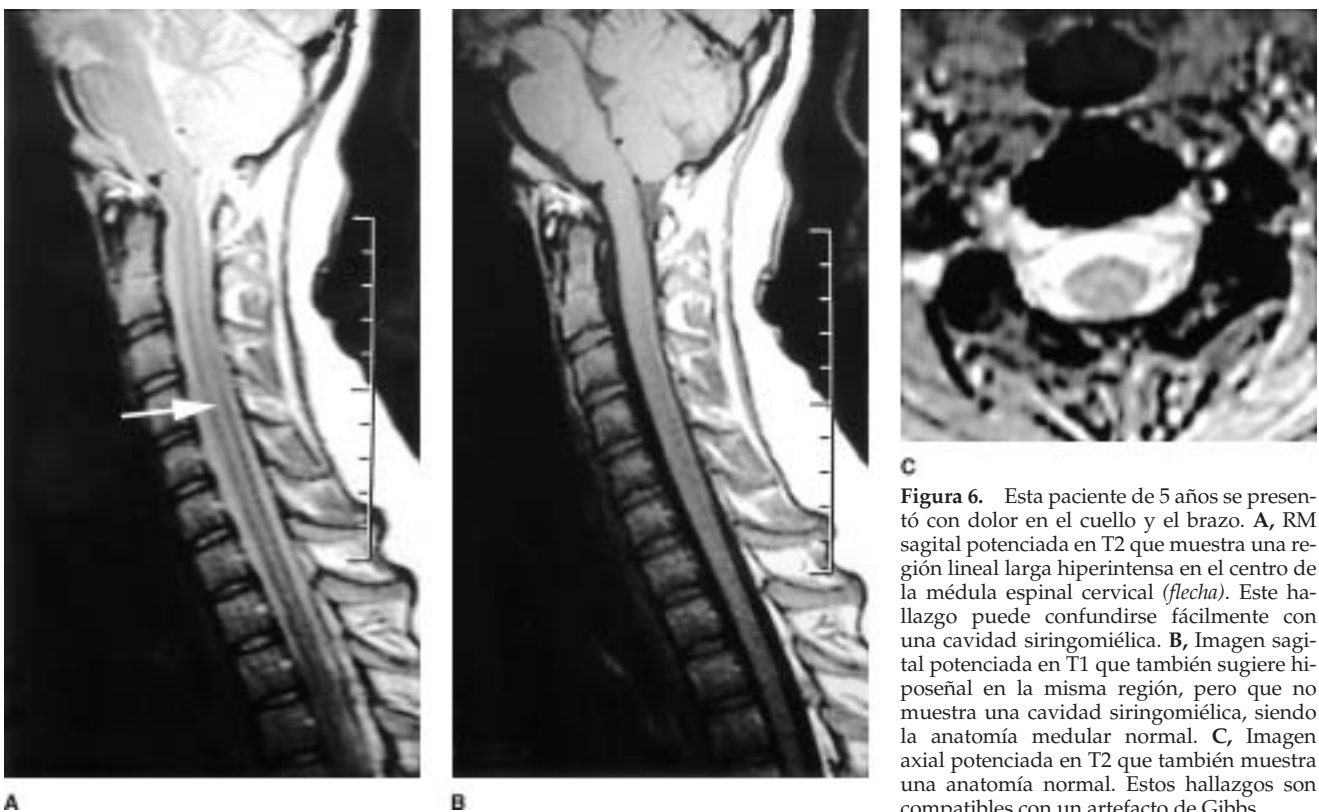


Figura 6. Esta paciente de 5 años se presentó con dolor en el cuello y el brazo. **A**, RM sagital potenciada en T2 que muestra una región lineal larga hiperintensa en el centro de la médula espinal cervical (*flecha*). Este hallazgo puede confundirse fácilmente con una cavityad siringomiélica. **B**, Imagen sagital potenciada en T1 que también sugiere hiposeñal en la misma región, pero que no muestra una cavityad siringomiélica, siendo la anatomía medular normal. **C**, Imagen axial potenciada en T2 que también muestra una anatomía normal. Estos hallazgos son compatibles con un artefacto de Gibbs.

deben confirmarse en las imágenes axiales.

Otra afección que se ve a menudo en pacientes con disrafismo espinal es la siringohidromielia o siringomielia (fig. 5). La siringomielia es una cavidad longitudinal en el interior de la médula espinal que puede o no comunicar con el canal central. Se ha intentado explicar su etiología relacionándola con alteraciones del desarrollo, traumatismos, inflamación, isquemia o presión. Las imágenes sagitales muestran una lesión hipointensa en T1 e hiperintensa en T2 en el interior del parénquima de la médula espinal.

El artefacto de Gibbs, o artefacto por truncado, puede imitar el aspecto de una cavidad siringomiélica en las imágenes sagitales (fig. 6). El artefacto de Gibbs se aprecia en las imágenes sagitales potenciadas en T1 y T2 como una región lineal de alteración de la intensidad de la señal en el centro de la médula espinal. Por lo tanto, es importante estudiar las imágenes axiales en T1 y T2 de forma secuencial para confirmar el diagnóstico. El artefacto de Gibbs se origina por no utilizar una frecuencia espacial suficientemente alta para la obtención de datos. Puede corregirse utilizando una matriz de mayor resolución.

Malformaciones de Chiari

En los pacientes con disrafismo espinal se aprecian frecuentemente malformaciones de Chiari. La malformación de Chiari tipo I es una ectopia de las amígdalas cerebelosas en la que éstas se extienden por debajo del nivel del foramen magnum. La cifra que en general se acepta para afirmar que existe una herniación por debajo del foramen magnum es de 5 mm. Mikulis y cols.²³ identificaron variaciones del límite superior de la normalidad en función de la edad: 6 mm en la primera década de la vida, 5 mm en la segunda y tercera décadas, y 3 mm al llegar a la novena década. En la malformación de Chiari tipo I, el tronco del encéfalo no está afectado y el cuarto ventrículo permanece en posición normal. La malformación de Chiari tipo I se asocia con siringohidromielia, alteraciones de la unión craneovertebral e invaginación basilar. La malformación de

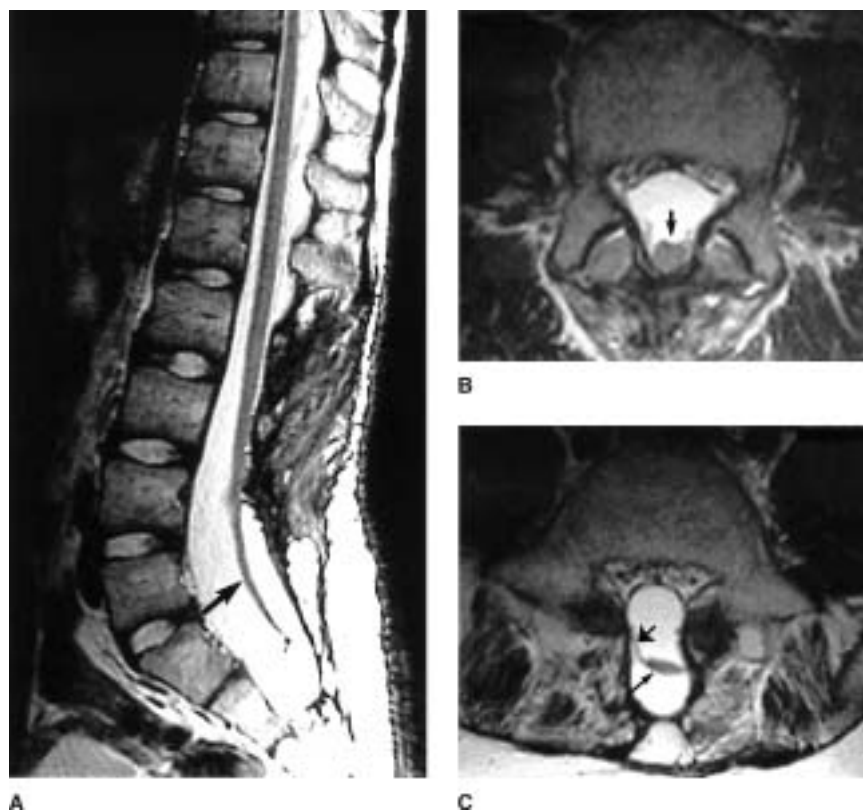


Figura 7. Varón de 14 años con antecedentes de lipomeningocele. Tras la resección quirúrgica, se produjeron alteraciones en la función intestinal y urinaria así como parestesias en la extremidad inferior de nueva aparición. **A,** Imagen sagital potenciada en T2 que muestra el cono medular hasta aproximadamente L4 y el *filum terminale* hasta S1 (flecha), hallazgos compatibles con síndrome de la médula trabada. **B,** Imagen axial en T2 a nivel L4 que muestra la localización medular posterior en el interior del saco tecal (flecha). **C,** Imagen axial en T2 a nivel L5 que muestra la placoda (flecha fina) con salida de la raíz nerviosa en el lado derecho (flecha gruesa) en dirección anterior y lateral.

Chiari tipo II es más grave y consiste en un desplazamiento inferior del tronco del encéfalo y la parte inferior del cerebelo hacia el canal medular cervical, con una reducción del tamaño de la fosa posterior.

Síndrome de la médula trabada

El síndrome de la médula trabada se identifica en un importante número de pacientes con disrafismo espinal, especialmente en los que han sido tratados mediante cierre quirúrgico del defecto.^{24,25} Durante la vida fetal, la médula espinal alcanza el nivel sacrocóxigeo. Debido al crecimiento rápido de la columna vertebral después del nacimiento, la médula asciende hasta el nivel L1-L2 en el recién nacido. Durante la formación de un defecto disráfico en la co-

lumna como el mielomeningocele, los elementos neurales abiertos con frecuencia se adhieren al ectodermo periférico, lo que deja la médula espinal atrapada o trabada. Con el cierre quirúrgico del saco, la médula espinal tiene cierta tendencia a adherirse en la zona de reparación. A medida que el niño crece, estas adherencias pueden trabar la médula e impedir su migración en sentido cefálico, que al final provocará la aparición de síntomas. Por lo tanto, en los pacientes con disrafia espinal y procesos relacionados con la misma, como el mielomeningocele, el mielocelo, el lipomeningocele y la diastematomelia, debe descartarse la existencia de una médula trabada como posible causa de deterioro de la función neurológica.

La RM ha sido propuesta como la

técnica de imagen inicial, y posiblemente la única necesaria, para valorar a los pacientes en los que se sospecha síndrome de la médula trabada.⁹ Es necesario estudiar las imágenes sagitales para determinar a qué nivel se encuentra el cono medular (fig. 7). El hallazgo del cono medular por debajo del espacio L2-L3 en un niño mayor de 5 años es anormal e indica un posible atrapamiento medular.^{8,9} Además, cuando la médula está trabada, suele estar desplazada posteriormente en el canal medular. Otros hallazgos incluyen lipoma o tejido cicatricial en el interior del espacio epidural y un mayor grosor del filum terminale.⁹ Aunque mediante RM puede determinarse si la médula espinal está anatómicamente trabada, estos hallazgos deben correlacionarse con los síntomas del paciente y es preciso realizar exploraciones físicas seriadas antes de considerar la liberación quirúrgica.

Controversias sobre la RM de la columna pediátrica

La RM de la columna pediátrica sigue siendo controvertida en varios procesos, entre los que se incluye la escoliosis y el síndrome de la médula trabada, así como en los casos tratados con instrumentación vertebral. También existe cierta preocupación respecto a su seguridad.

Escoliosis

La utilización de imágenes de RM en la escoliosis tiene como principal objetivo detectar alteraciones intravertebrales, que se asocian con mayor frecuencia a los patrones menos habituales de escoliosis, como las curvas torácicas izquierdas, alteraciones en la exploración neurológica o corta edad en el momento de la presentación.²⁶⁻³⁰ Recientemente, Do y cols.²⁶ concluyeron que la RM no está indicada antes de realizar una artrodesis

en un paciente con escoliosis idiopática en la adolescencia si la exploración física y neurológica son normales.

Una de las áreas de especial controversia es la presencia de dolor lumbar en pacientes con escoliosis. En un estudio retrospectivo de 2.442 pacientes, Ramirez y cols.³¹ encontraron que los mejores factores predictivos de la existencia de patología subyacente son una curva torácica izquierda y alteraciones detectadas en la exploración neurológica. Estos autores encontraron una asociación significativa entre dolor lumbar y edad mayor de 15 años ($p < 0,001$), madurez esquelética ($p < 0,001$), posmenarquia ($p < 0,001$) y antecedentes de traumatismo ($p < 0,018$). Concluyeron que no es necesario realizar estudios diagnósticos extensos en todo paciente que se presente con escoliosis y dolor lumbar. La RM debe reservarse para aquellos pacientes con escoliosis infantil o juvenil, curvas

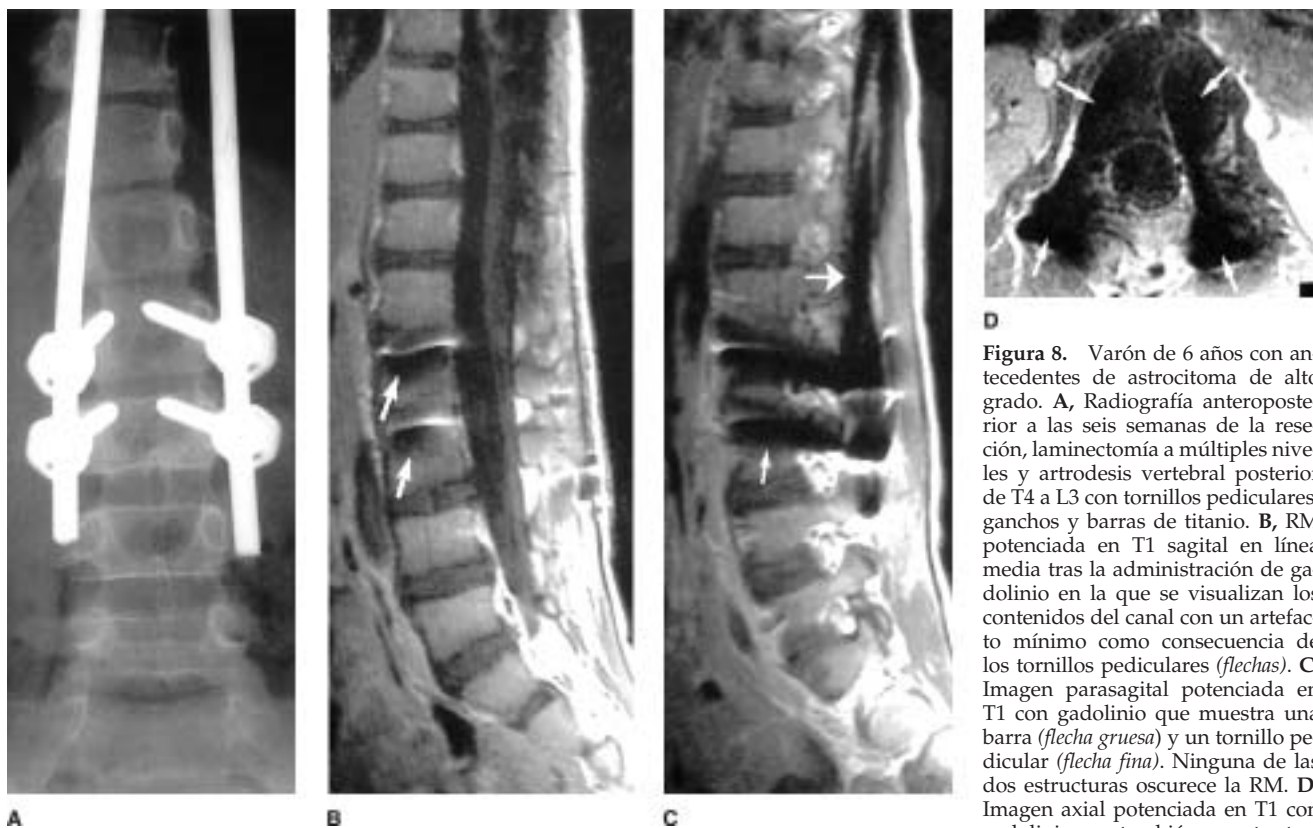


Figura 8. Varón de 6 años con antecedentes de astrocitoma de alto grado. **A**, Radiografía anteroposterior a las seis semanas de la resección, laminectomía a múltiples niveles y artrodesis vertebral posterior de T4 a L3 con tornillos pediculares, ganchos y barras de titanio. **B**, RM potenciada en T1 sagital en línea media tras la administración de gadolinio en la que se visualizan los contenidos del canal con un artefacto mínimo como consecuencia de los tornillos pediculares (*flechas*). **C**, Imagen parasagital potenciada en T1 con gadolinio que muestra una barra (*flecha gruesa*) y un tornillo pedicular (*flecha fina*). Ninguna de las dos estructuras oscurece la RM. **D**, Imagen axial potenciada en T1 con gadolinio que también muestra tornillos pediculares (*flechas*) y un canal medular permeable.

torácicas izquierdas o hallazgos anormales en la exploración neurológica. Las imágenes coronales son especialmente útiles en el estudio de los pacientes con escoliosis, por lo que deben formar parte del protocolo sistemático de imágenes.

Síndrome de la médula trabada

La incidencia de síndrome de la médula trabada detectado por RM sigue siendo controvertida. Cuando la RM identifica una médula trabada, debe decidirse si se opta por tratamiento conservador o quirúrgico. Aunque la RM detecta con facilidad una médula anatómicamente trabada, la indicación de cirugía depende de la historia clínica y los resultados de exploraciones físicas seriadas.

Técnicas de imagen en presencia de implantes

La RM de la columna en presencia de instrumentación es generalmente una técnica segura, pero se ve limitada por los artefactos que produce el implante. Las secuencias en presencia de titanio producen menos degradación por artefacto, porque es menos ferromagnético que el acero inoxidable (fig. 8).^{32,33} Por lo tanto, puede que sea mejor utilizar implantes de titanio en aquellos pacientes que necesiten seguimiento con RM. Sin embar-

go, si se utilizan las técnicas de imagen adecuadas, puede obtenerse información útil desde el punto de vista clínico y de forma segura en presencia de ambos tipos de implantes.³⁴ Pueden utilizarse secuencias especializadas, como la secuencia de reducción de artefactos metálicos (*metal artifact reduction sequence* o MARS), para ayudar a reducir el artefacto que oscurece los tejidos como consecuencia de la presencia de metal junto a la columna, produciendo imágenes de calidad mejorada en comparación con las imágenes convencionales potenciadas en T1.³⁵

Seguridad de la RM

La RM puede estar contraindicada en pacientes con implantes, materiales o dispositivos ferromagnéticos, debido al riesgo de migración, calentamiento o inducción de corriente.³⁶ Sherlock y cols.³⁶ revisaron y sintetizaron los resultados de más de 80 estudios y describieron las cualidades ferromagnéticas de 338 objetos, entre los que se incluían 30 implantes, materiales o dispositivos ortopédicos. Encontraron que la mayor parte de los implantes ortopédicos están fabricados con materiales no ferromagnéticos, por lo que son seguros para la realización de RM. Existen también preocupaciones sobre la seguridad

en el interior de la sala de RM. Las áreas alrededor y en el interior de la sala deben supervisarse con frecuencia para detectar la presencia de equipamiento ferromagnético que puede actuar como proyectil y producir lesiones al paciente o al personal hospitalario. Existe una publicación reciente en la que se han descrito accidentes con proyectiles cilíndricos por haber dejado en la sala de RM bombonas ferromagnéticas de óxido nítrico u oxígeno.³⁷ Todo el equipamiento que se utilice (como las bombas intravenosas, las camas hospitalarias y los instrumentos manuales) deben ser compatibles con la RM.

Conclusiones

La RM es una técnica de imagen avanzada excelente para visualizar la columna pediátrica. La comprensión básica del aspecto normal en RM de la columna a diferentes edades, las características de señal de varios procesos patológicos y el diagnóstico diferencial de la patología de la columna pueden ayudar al clínico a correlacionar la anamnesis y la exploración física con los hallazgos en la RM para establecer el diagnóstico más probable.

Bibliografía

1. Beebe DS, Tran P, Bragg M, Stillman A, Truwitt C, Belani KG: Trained nurses can provide safe and effective sedation for MRI in pediatric patients. *Can J Anaesth* 2000;47:205-210.
2. Sury MR, Hatch DJ, Deeley T, Dicks-Mireaux C, Chong WK: Development of a nurse-led sedation service for paediatric magnetic resonance imaging. *Lancet* 1999;353:1667-1671.
3. Vade A, Sukhani R, Dolenga M, Habisohn-Schuck C: Chloral hydrate sedation of children undergoing CT and MR imaging: Safety as judged by American Academy of Pediatrics guidelines. *AJR Am J Roentgenol* 1995;165:905-909.
4. American Academy of Pediatrics Committee on Drugs: Guidelines for monitoring and management of pediatric patients during and after sedation for diagnostic and therapeutic procedures. *Pediatrics* 1992;89(6 pt 1):1110-1115.
5. Malviya S, Voepel-Lewis T, Prochaska G, Tait AR: Prolonged recovery and delayed side effects of sedation for diagnostic imaging studies in children. *Pediatrics* 2000;105:e42. Available at <http://www.pediatrics.org/cgi/reprint/105/3/342.pdf>. Accessed May 2, 2003.
6. Goske MJ, Modic MT, Yu S: Pediatric spine: Normal anatomy and spinal dysraphism, in Modic MT, Masaryk TJ, Ross JS (eds): *Magnetic Resonance Imaging of the Spine*, ed 2. St. Louis, MO: Mosby-Year Book, 1994, pp 352-387.
7. Sze G, Baierl P, Bravo S: Evolution of the infant spinal column: Evaluation with MR imaging. *Radiology* 1991;181:819-827.
8. Barson AJ: The vertebral level of termination of the spinal cord during normal and abnormal development. *J Anat* 1970;106:489-497.
9. Moufarrij NA, Palmer JM, Hahn JF, Weinstein MA: Correlation between magnetic resonance imaging and surgical findings in the tethered spinal cord. *Neurosurgery* 1989;25:341-346.
10. Saifuddin A, Burnett SJ, White J: The variation of position of the conus medullaris in an adult population: A magnetic resonance imaging study. *Spine* 1998;23:1452-1456.
11. Auletta JJ, John CC: Spinal epidural abscesses in children: A 15-year experience and review of the literature. *Clin Infect Dis* 2001;32:9-16.
12. du Lac P, Panuel M, Devred P, Bollini G, Padovani J: MRI of disc space infection in infants and children: Report of 12 cases. *Pediatr Radiol* 1990;20:175-178.
13. Modic MT, Feiglin DH, Piraino DW, et al: Vertebral osteomyelitis: Assessment using MR. *Radiology* 1985;157:157-166.
14. Fernandez M, Carrol CL, Baker CJ: Discitis and vertebral osteomyelitis in children: An 18-year review. *Pediatrics* 2000; 105:1299-1304.
15. Miller GM, Forbes GS, Onofrio BM:

- Magnetic resonance imaging of the spine. *Mayo Clin Proc* 1989;64:986-1004.
16. Kriss VM, Kriss TC: SCIWORA (spinal cord injury without radiographic abnormality) in infants and children. *Clin Pediatr (Phila)* 1996;35:119-124.
 17. Pang D, Pollack IF: Spinal cord injury without radiographic abnormality in children: The SCIWORA syndrome. *J Trauma* 1989;29:654-664.
 18. Banerian KG, Wang AM, Samberg LC, Kerr HH, Wesolowski DP: Association of vertebral end plate fracture with pediatric lumbar intervertebral disk herniation: Value of CT and MR imaging. *Radiology* 1990;177:763-765.
 19. Walker HS, Dietrich RB, Flannigan BD, Lufkin RB, Peacock WJ, Kangaroo H: Magnetic resonance imaging of the pediatric spine. *Radiographics* 1987;7:1129-1152.
 20. Altman NR, Altman DH: MR imaging of spinal dysraphism. *AJNR Am J Neuroradiol* 1987;8:533-538.
 21. Byrd SE, Darling CF, McLone DG, Tomita T: MR imaging of the pediatric spine. *Magn Reson Imaging Clin N Am* 1996;4:797-833.
 22. Modic MT, Yu S: Normal anatomy, in Modic MT, Masaryk TJ, Ross JS (eds): *Magnetic Resonance Imaging of the Spine*, ed 2. St. Louis, MO: Mosby-Year Book, 1994, pp 37-79.
 23. Mikulis DJ, Diaz O, Egglin TK, Sanchez R: Variance of the position of the cerebellar tonsils with age: Preliminary report. *Radiology* 1992;183:725-728.
 24. Hall WA, Albright AL, Brunberg JA: Diagnosis of tethered cords by magnetic resonance imaging. *Surg Neurol* 1988; 30:60-64.
 25. Heinz ER, Rosenbaum AE, Scarff TB, Reigel DH, Drayer BP: Tethered spinal cord following meningocele repair. *Radiology* 1979;131:153-160.
 26. Do T, Frasc C, Burke S, Widmann RF, Rawlins B, Boachie-Adjei O: Clinical value of routine preoperative magnetic resonance imaging in adolescent idiopathic scoliosis: A prospective study of three hundred and twenty-seven patients. *J Bone Joint Surg Am* 2001;83:577-579.
 27. Evans SC, Edgar MA, Hall-Craggs MA, Powell MP, Taylor BA, Noordeen HH: MRI of 'idiopathic' juvenile scoliosis: A prospective study. *J Bone Joint Surg Br* 1996;78:314-317.
 28. Gupta P, Lenke LG, Bridwell KH: Incidence of neural axis abnormalities in infantile and juvenile patients with spinal deformity: Is a magnetic resonance image screening necessary? *Spine* 1998; 23:206-210.
 29. Mejia EA, Hennrikus WL, Schwend RM, Emans JB: A prospective evaluation of idiopathic left thoracic scoliosis with magnetic resonance imaging. *J Pediatr Orthop* 1996;16:354-358.
 30. Schwend RM, Hennrikus W, Hall JE, Emans JB: Childhood scoliosis: Clinical indications for magnetic resonance imaging. *J Bone Joint Surg Am* 1995;77:46-53.
 31. Ramirez N, Johnston CE, Browne RH: The prevalence of back pain in children who have idiopathic scoliosis. *J Bone Joint Surg Am* 1997;79:364-368.
 32. Rudisch A, Kremser C, Peer S, Kathrein A, Judmaier W, Daniaux H: Metallic artifacts in magnetic resonance imaging of patients with spinal fusion: A comparison of implant materials and imaging sequences. *Spine* 1998;23:692-699.
 33. Rupp R, Ebraheim NA, Savolaine ER, Jackson WT: Magnetic resonance imaging evaluation of the spine with metal implants: General safety and superior imaging with titanium. *Spine* 1993;18:379-385.
 34. Lyons CJ, Betz RR, Mesgarzadeh M, Revesz G, Bonakdarpour A, Clancy M: The effect of magnetic resonance imaging on metal spine implants. *Spine* 1989; 14:670-672.
 35. Chang SD, Lee MJ, Munk PL, Janzen DL, MacKay A, Xiang QS: MRI of spinal hardware: Comparison of conventional T1-weighted sequence with a new metal artifact reduction sequence. *Skeletal Radiol* 2001;30:213-218.
 36. Shellock FG, Morisoli S, Kanal E: MR procedures and biomedical implants, materials, and devices: 1993 update. *Radiology* 1993;189:587-599.
 37. Chaljub G, Kramer LA, Johnson RF III, Johnson RF Jr, Singh H, Crow WN: Projectile cylinder accidents resulting from the presence of ferromagnetic nitrous oxide or oxygen tanks in the MR suite. *AJR Am J Roentgenol* 2001;177:27-30.