

Resonancia magnética cardiovascular en las cardiopatías congénitas

Montserrat Bret-Zurita^a • Emilio Cuesta-López^a • Luis Guereta^b • José María Oliver^c • Ángel Aroca^d

^aUnidad de Resonancia Magnética Cardiovascular. Servicio de Radiodiagnóstico. Hospital Universitario La Paz. Madrid.

^bServicio de Cardiología Infantil. Hospital Universitario La Paz. Madrid.

^cUnidad de Cardiopatías Congénitas del adulto. Servicio de Cardiología. Hospital Universitario La Paz. Madrid.

^dServicio de Cirugía Cardíaca Infantil. Hospital Universitario La Paz. Madrid. España.

Presentamos nuestra experiencia en el estudio de las cardiopatías congénitas (CPC) y seguimiento posquirúrgico de dos años de duración, con resonancia magnética (RM) y angiorresonancia tridimensional (angio-RM 3D).

Se evalúan principalmente los aspectos técnicos de realización, administración de contraste y de preparación anestésica en los casos pediátricos.

No se detectaron complicaciones tras la administración de gadolinio, y solamente se observaron dos casos de eritema cutáneo difuso transitorio sin aumento de la temperatura corporal.

La RM y más concretamente la angio-RM con gadolinio permite realizar un adecuado diagnóstico y seguimiento posquirúrgico de las CPC, y evita el riesgo de las radiaciones ionizantes y del cateterismo cardíaco en muchos casos.

Palabras clave: Cardiopatías congénitas. Resonancia magnética cardiovascular. Angiorresonancia. Angio-RM 3D. Gadolinio. Cirugía cardíaca.

Cardiovascular Magnetic Resonance in Congenital Cardiopathies

Presented is our experience in the study of congenital cardiopathies and 2-year post-surgical follow-up with Magnetic Resonance (MR) and three dimensional angiogram (3D MR angiogram).

Primarily evaluated are aspects relating to technical realization, contrast media administration, and anaesthetic preparation in pediatric cases.

There were no complications detected after administration of gadopentate dimeglumine, and only two cases of transitory diffuse cutaneous erythema were observed without increase in body temperature.

MR, and particularly MR angiogram with gadopentate dimeglumine, permits the making of suitable diagnoses and post-surgical follow-ups of congenital cardiopathies, in many cases avoiding the risks inherent in ionizing radiations and cardiac catheterism.

Key words: Congenital Cardiopathies. Cardiovascular Magnetic Resonance. Angiogram. 3D MR Angiogram. Gadopentate Dimeglumine

Las cardiopatías congénitas (CPC) se producen por factores ambientales y anomalías cromosómicas, como la trisomía, supresión y mosaicismo. La incidencia estimada de las cardiopatías congénitas es de un 5-8 por 1.000 nacidos vivos, y éstas son una importante causa de morbilidad en el mundo¹. Con la mejora en el diagnóstico y el tratamiento de estas enfermedades, la supervivencia ha aumentado en las últimas décadas, y se estima que aproximadamente el 85% de los niños con estas anomalías alcanzan la vida adulta².

El principal objetivo de las técnicas de imagen en las CPC es la visualización lo más precisa posible de la anatomía cardiovascular, en muchos casos compleja, y la valoración funcional de las malformaciones cardíacas.

La fácil accesibilidad de la ecografía transtorácica (ETT) ha hecho de ésta una técnica primaria de diagnóstico inocuo; es la

técnica que más información aporta, sobre todo en pacientes pediátricos con buena ventana acústica y deja el uso de la resonancia magnética (RM) en un segundo plano de estudio³.

Las principales aplicaciones de la RM se han dirigido a valorar lesiones visualizadas de forma incompleta por ecocardiografía, visualización tridimensional y relaciones anatómicas en casos de CPC complejas.

Además, la RM no requiere el uso de contraste yodado ni radiaciones ionizantes, ésta última es la principal ventaja en los pacientes pediátricos frente al diagnóstico angiográfico, a los que se ha sometido a grandes dosis de radiación durante la cineangiografía inicial y en los controles posquirúrgicos⁴.

Los avances tecnológicos, con secuencias más rápidas y la introducción de técnicas de angio-RM, han aumentando la capacidad diagnóstica de la RM para valoración morfológica (cámaras cardíacas, válvulas, determinar vasos colaterales en la coartación y anomalías pulmonares) y cuantificación del flujo o estudios funcionales (cuantificar las derivaciones, el flujo de arterias pulmonares, la regurgitación valvular, los volúmenes ventriculares, etc.) con el único y principal inconveniente de la disponibilidad^{5,6}.

En los pacientes posquirúrgicos con mala ventana acústica (tejido cicatricial, deformidad torácica, interposición pulmonar), la

Correspondencia:

MONTSERRAT BRET-ZURITA. Servicio de Radiodiagnóstico. Hospital Universitario La Paz. Paseo de la Castellana, 261. 28046 Madrid. España. m_bretzurita@yahoo.es

Recibido: 14-II-2003

Aceptado: 8-III-2004

RM no tiene limitaciones de acceso ni de elección de los planos de corte, como puede ocurrir en la ETT. Esto permite una valoración completa de las relaciones anatómicas y un seguimiento de la evolución del proceso, reservando los estudios angiográficos para fines terapéuticos (angioplastia, colocación de *stent*, medida de presiones arteriales, etc.).

En general, la RM, así como la ecocardiografía transesofágica (ETE), mostrarán una mayor utilidad en los pacientes pediátricos de más edad y adultos (peor ventana acústica) y en las anomalías complejas. La RM es, en definitiva, una técnica objetiva, reproducible y menos dependiente del operador que la ecocardiografía⁷.

En el presente estudio nos proponemos mostrar nuestra experiencia en RM cardíaca, centrándonos en las cardiopatías congénitas.

Nos basamos en la revisión de 284 estudios de cardiopatías congénitas realizados durante dos años (octubre 2000-octubre 2002). De estos 284 pacientes, el 59% eran varones y el 41%

mujeres, con edades comprendidas entre dos días y 85 años (media 17 años); el 30,5% eran menores de seis años y el 6,3% menores de un mes. (tablas 1 y 2).

ASPECTOS BÁSICOS DE LA ANATOMÍA CARDIOVASCULAR

El estudio sistemático de la anatomía cardiovascular es necesario en la valoración de las CPC, especialmente en la CPC compleja, en la que las relaciones entre las aurículas, ventrículos y

TABLA 1

Principales diagnósticos	Número de casos
Coartación aorta	87
CIV	25
Tetralogía de Fallot	21
Atresia pulmonar	22
Transposición de grandes vasos	17
Arteria subclavia aberrante	14 (4 ASD; 10 ASI)
Atresia tricuspídea	13
Hipoplasia ventrículo derecho	12
Patología de válvula aórtica	11
Síndrome asplenia-poliesplenia	7
Dextrocardia	6
Truncus arterioso	4
Canal auriculoventricular	7
Interrupción arco aórtico	2
Arco aórtico derecho	12
Arco aórtico doble	2
Vena cava superior doble	6
DVPA	6
DAP	5
Lazo de la arteria pulmonar (<i>sling</i>)	2

ASD: arteria subclavia derecha; ASI: arteria subclavia izquierda; CIV: comunicación interventricular; DAP: ductus arterioso persistente; DVPA: drenaje venoso pulmonar anómalo.

TABLA 2

Procedimientos quirúrgicos	Número de casos
Corrección de coartación aorta (parche o procedimiento de Waldhausen)	80
Glenn	36
Fontan	15
Jatene	15
Rastelli	11
Blalock-Taussig shunt	11
Norwood	7
Mustard, Sening	2
Waterston (Cooley)	1
Potts	1

TABLA 3

ESQUEMA DE PATOLOGÍAS CARDÍACAS CONGÉNITAS (ANÁLISIS SECUENCIAL SEGMENTARIO)

Anomalías auriculares
<i>Situs</i> auricular
Yuxtaposición de apéndices atriales
Corazón triatrial
Síndrome de asplenia
Defecto septal auricular verdadero
Defecto del <i>ostium secundum</i>
Aurícula común
Defecto del seno venoso
Anomalías de conexión auriculoventricular
Defecto de los cojines endocárdicos (DCE)
Atresia tricuspídea
Anomalia de Ebstein
Canal A-V completo
Anomalías del septo ventricular
Aneurisma del septo membranoso
Defectos del septo muscular interventricular
Ventrículo común
Anomalías de la conexión ventriculoarterial
Anomalías en el tracto de salida del VD
Tetralogía de Fallot
Complejo de Eisenmenger
Doble salida del VD
Obstrucción de salida del VD (atresia pulmonar) con septo interventricular intacto
Anomalías del conducto de salida del VI
Válvula aórtica bicúspide
Estenosis valvular aórtica
Atresia aórtica
Otras anomalías de conexión ventriculoarterial
<i>Truncus arteriosus</i>
Transposición de grandes arterias
Anomalías de arterias coronarias
Anomalías del arco aórtico
Arco aórtico doble
Arco aórtico derecho con conducto arterioso contralateral del lado izquierdo
Arteria pulmonar con origen en aorta ascendente
Arteria pulmonar con origen en un conducto arterioso
Suspensión vascular
Coartación de aorta
Anomalías de las grandes venas sistémicas
Vena cava superior izquierda
Drenaje a través de la vena ácigos de la vena cava inferior
Vena cava inferior doble
Conexión venosa pulmonar anómala (CVPA)
CVPA parcial
CVPA total con vena cava superior izquierda
CVPA total con el seno coronario
CVPA total infradiaphragmática

grandes vasos pueden estar muy alteradas respecto a la situación anatómica normal (*situs solitus*). La relación entre aurículas, ventrículos y grandes vasos es la base del llamado análisis secuencial segmentario⁸ (tabla 3).

El análisis segmentario empieza con la definición de la situación auricular o *situs* atrial. Se intentará determinar la morfología de las orejuelas (derecha: ancha y triangular; izquierda: estrecha, en forma de dedo) y descartar la existencia de un posible *situs inversus*, mucho menos frecuente, o de un *situs* ambiguo (figs. 1 y 2). Esta definición anatómica no siempre es fácil (cardiopatías complejas), y se debe definir el *situs* por la propia estructura auricular, es decir, la de sus orejuelas³. De forma indirecta, la valoración de los bronquios principales y su relación con las arterias pulmonares o la disposición de las vísceras abdominales, nos ayudarán al diagnóstico, ya que su localización determina la situación auricular y suelen ser concordantes con el *situs* auricular⁹.

El siguiente paso es identificar el ventrículo derecho y el ventrículo izquierdo mediante diferencias anatómicas existentes entre ambos; el ventrículo derecho, de pared más fina y trabeculada, tiene una banda moderadora, un infundíbulo muscular y una inserción septal de la válvula tricúspide más baja que la mitral.

Las relaciones espaciales de los grandes vasos y sus anomalías asociadas se deben identificar, y se reconocen por sus aspectos morfológicos y sus ramificaciones y por las alteraciones características asociadas a sus respectivas localizaciones.

En condiciones normales, la arteria pulmonar nace del ventrículo morfológicamente derecho, en situación anterior e izquierda, consta de un infundíbulo que separa la válvula pulmonar de la tricúspide y se bifurca en arteria pulmonar derecha e izquierda. La aorta nace del ventrículo morfológicamente izquierdo y se

sitúa en posición posterior y a la derecha del tronco pulmonar, sin infundíbulo (concordancia ventriculoarterial) y se continúa con el arco aórtico y las arterias braquiocefálicas. De este modo, la arteria pulmonar recibe la sangre venosa sistémica y la aorta recibe la sangre venosa procedente de los pulmones.

CONSIDERACIONES TÉCNICAS DE RESONANCIA MAGNÉTICA EN LAS CARDIOPATÍAS CONGÉNITAS

Los aspectos técnicos utilizados en el estudio de las CPC son similares a los empleados en cualquier otra patología cardíaca, con la salvedad de los pacientes pediátricos. La mayoría de los equipos de RM de alto campo no disponen de secuencias específicas para pacientes pediátricos de tan bajo peso. En nuestro equipo (Magnetom Vision 1.5 T, Siemens) hemos adaptado algunas secuencias para estos pacientes, en los que se precisan cortes más finos y poder adecuar los TR al período cardíaco (tabla 4).

Deberemos ajustarnos lo más posible al peso del paciente (sobre todo en neonatos, prematuros y niños de escaso peso corporal), con el fin de no sobrepasar el límite de SAR (tasa de absorción específica)^{13,14}.

Secuencias eco del espín y turbo eco del espín

Las secuencias eco del espín (SE) y turbo eco del espín (TSE), se utilizan para la valoración morfológica del corazón y de los grandes vasos, así como para la caracterización tisular. Constituyen la base del estudio anatómico, al mostrar la sangre en movimiento una señal negra que les da un contraste natural respecto a las estructuras adyacentes.

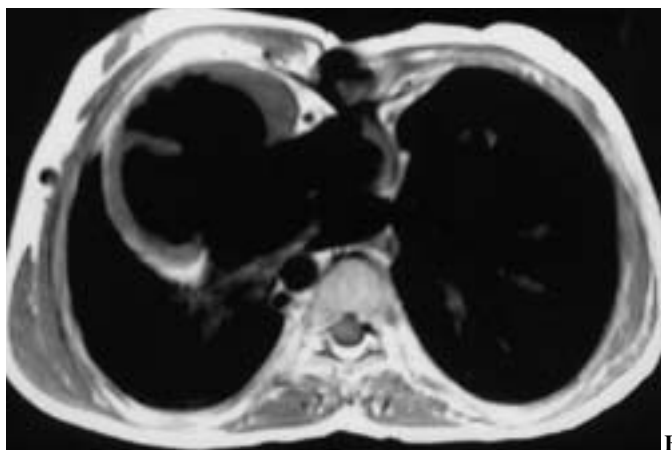


Fig. 1.—Paciente con dextrocardia y *situs inversus*. A) Secuencia SE (HASTE) coronal con sincronismo cardíaco. B) Secuencia TSE axial. Canal auriculoventricular completo.

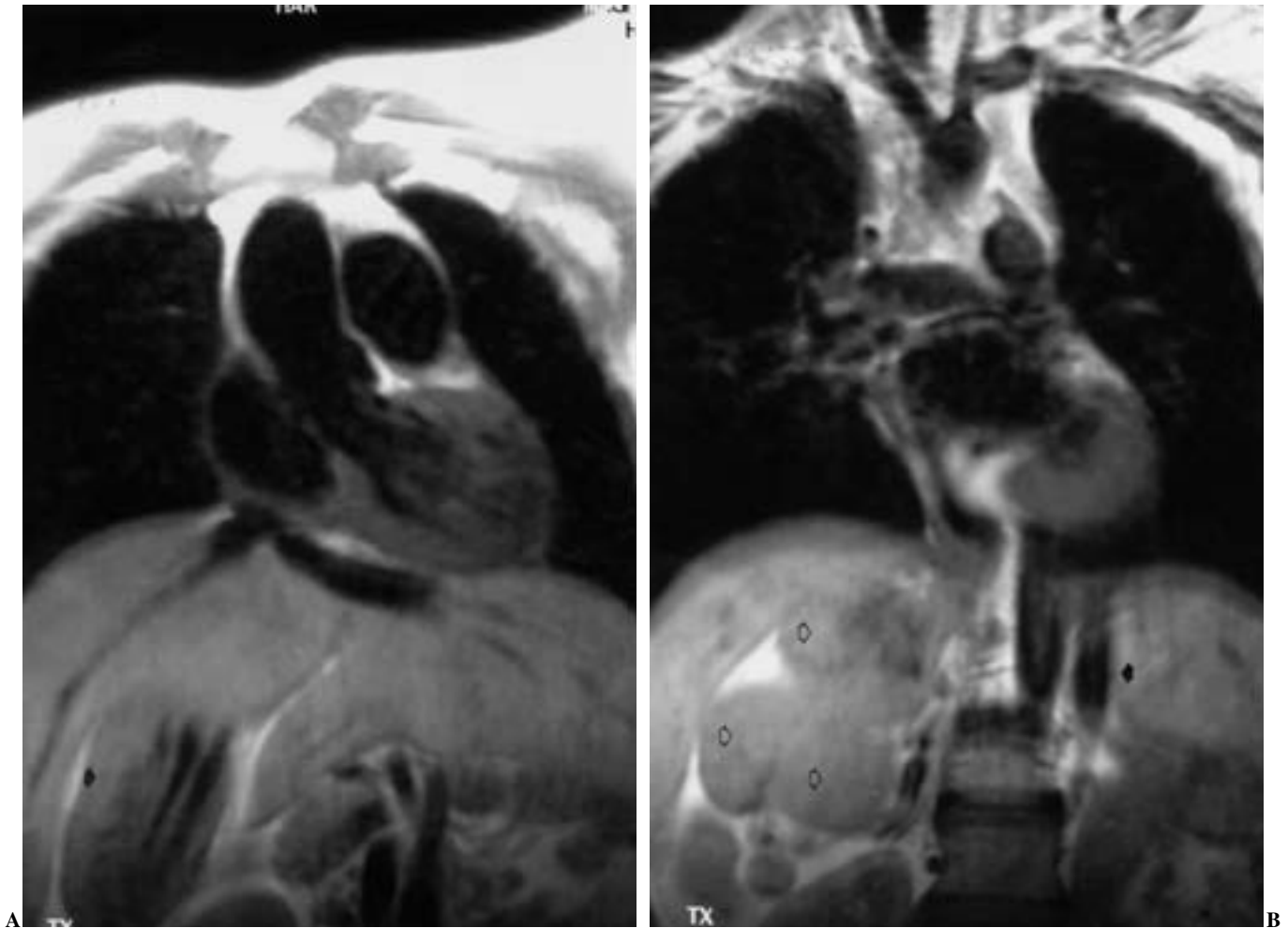


Fig. 2.—Síndrome de poliesplenía asociado a isomerismo izquierdo. Paciente de 12 años de edad con síndrome rubeólico. TSE en proyección coronal. A) Cámara gástrica en hipocondrio derecho (flecha), hígado «en torta» de situación central. B) Estenosis pulmonar severa, numerosos bazo localizados en hipocondrio derecho (flechas blancas) y vena cava inferior a la izquierda de la aorta abdominal (flecha).

La imagen obtenida es de elevada resolución espacial. Además, se puede obtener en los diferentes planos del espacio, que nos permitirán estudiar todos los ejes cardíacos (corto, largo y cuatro cámaras). El tamaño del paciente determinará el grosor de corte, mejorando el detalle anatómico y reduciendo efectos de volumen parcial (3-6 mm).

Es importante establecer un buen sincronismo cardíaco, ya que estas secuencias se adquieren con tiempos de repetición (TR) cortos (adecuados a la frecuencia y período cardíaco) y tiempos de eco (TE) cortos (TE, 20-30 ms), obteniendo imágenes potenciadas en T1, con dos a cuatro adquisiciones que permiten optimizar la señal-ruido. Una vez localizada la patología, podemos realizar secuencias unicorte con grosor más fino y mayor resolución espacial en las diferentes potenciaciones (T1, T2, IR). La administración de contraste paramagnético (gadolinio), nos permitirá valorar el comportamiento tisular y poder discernir mejor entre los diferentes tejidos¹⁵.

Secuencias eco de gradiente (EG)

Las secuencias eco de gradiente (EG), se caracterizan por mostrar la sangre en movimiento con una intensidad de señal

brillante. Se obtienen con una elevada resolución espacial usando TR cortos, TE cortos y ángulos de inclinación pequeños. Estas secuencias no se obtienen en tiempo real, sino en 128-256 latidos cardíacos, que permiten visualizarse posteriormente en modo cine representando un ciclo cardíaco.

Además, se pueden ver áreas de flujo turbulento, que se muestran como zonas de «vacío de señal» (negras), lo que nos permitirá detectar derivaciones vasculares, comunicación interauricular o interauricular, zonas de estenosis o insuficiencias valvulares^{5,6}.

La valoración funcional y de la contracción cardíaca requiere imágenes multifase con resolución temporal adecuada a los tiempos diastólico y sistólico.

Secuencias angio-RM

La angio-RM comprende una serie de secuencias EG que permiten una visualización no invasiva de la sangre en movimiento, como son el *time-of-flight* (TOF) o el *phase-contrast* (PC), que se emplearán principalmente en los estudios funcionales y de flujo de las CPC.

En las secuencias angio-RM con introducción de contraste, gadolinio, se aumenta la señal de la sangre de forma independiente de la velocidad de flujo y del ritmo cardíaco, lo que permite una adquisición tridimensional del conjunto anatómico a estudio. La posibilidad de realizar estas secuencias tridimensionales con sincronismo cardíaco aporta una mayor nitidez y contraste de imagen, siempre que el ritmo cardíaco sea homogéneo.

Esta adquisición de datos, nos permitirá un análisis posterior muy detallado de la morfología vascular y de las relaciones anatómicas de ésta¹⁶, bien sea mediante proyecciones de máxima intensidad (MIP), reconstrucciones multiplanares (MPR) o reconstrucciones de superficie en tres dimensiones (*shaded surface display* [SSD] y *volume rendering* [VRT])¹⁷.

Las reconstrucciones de superficie VRT, junto con el MPR son las principales herramientas de posprocesado de imagen. Suelen ser complementarias, aunque en los casos de CPC muy complejas, el VRT es la más importante inicialmente para hacerse una idea tridimensional global, rápida y lo más anatómica posible de la dirección y disposición anatómica de las estructuras cardiovasculares. El MPR lo utilizaremos principalmente para confirmar lo observado en el 3D de superficie y poder medir los diámetros y tamaños anatómicos de forma más exacta. Las proyecciones MIP serán de menor utilidad en los pacientes de menor peso o edad, puesto que no permiten discernir entre estructuras adyacentes de pequeño calibre.

TABLA 4
PROTOCOLO ESTUDIO RESONANCIA MAGNÉTICA
CARDIOVASCULAR

- Niños < 6-7 años con anestesia o sedación durante la exploración
- Niños > sin sedación
- Niños < 10 kg: antena cráneo
- Niños > 10 kg: antena *body phased-array*
- Colocación de electrodos de sincronismo cardíaco
- Estudio de RM
- 1. Localizadores EG en tres planos
- 2. Secuencias HASTE; *segmented HASTE* (*gating card.*), axial, coronal, sagital oblicuo
- 3. Secuencias TSE-T1 o T2 con *gating*; unicorte (en apnea) o multicorte multifase
- 4. Medición de flujo, secuencia *phase contrast* (PC) y/o estudio en modo cine (según patología)
- 5. Bolus test
- 6. Angio-RM: secuencia flash-3D; 3 mediciones: fase arterial (pulmonar o aorta), fase venosa (35 s) y tardía (70 s)
- 7. Reconstrucciones 3D: VRT-3D, nivel de ventana y centro para estudio de RM-tórax vascular:
 - Visión general; anatomía y disposición de las principales vísceras y vasos torácicos y abdominales
 - Recortar y ver con más detalle la región de interés. Modificar W/L y aumentar opacidad/brillo. Dar perspectiva de imagen
- 8. MPR: detalles anatómicos de las estructuras confirmando la disposición de los vasos observada en el VRT-3D, o descubrir otras estructuras adicionales:
 - Plano de corte lo más perpendicular o paralelo posible a la dirección del vaso
 - Medidas exactas de la reconstrucción MPR (con magnificación de la imagen si precisa)

PREPARACIÓN DEL PACIENTE

Para la realización de los estudios de RM cardiovascular, es aconsejable una mínima colaboración por parte del paciente, aunque no es estrictamente necesaria. Los estudios en apnea son aconsejables para obtener una imagen de mayor calidad y resolución espacial, así como para evitar movimientos durante la exploración. Para ello, debemos entrenar previamente al paciente para conseguir una buena sincronización y completar las secuencias según se precise apnea o no y según se esté adquiriendo datos o no. El papel del técnico en este entrenamiento es imprescindible, sobre todo en los pacientes pediátricos mayores de siete años y en los adultos. En algunos pacientes pediátricos de corta edad (5-10 años), se puede realizar la exploración con un familiar dentro de la sala de exploración, así se consigue realizar el estudio sin anestesia.

No obstante, en la mayoría de los niños menores de seis o siete años esto es inviable y la prueba se realizará con anestesia o sedación. En los estudios morfológicos se utilizan secuencias multicorte multifase, con respiración libre. Los estudios vasculares se realizan también en respiración libre, acortando al máximo el tiempo de adquisición de la secuencia, con la máxima señal/ruido posible. En los pacientes intubados, se coordina la adquisición de la secuencia con una parada controlada del respirador para producir el tiempo de apnea deseado (tabla 4).

En nuestro centro, la mayoría de las exploraciones con anestesia se realizan con una técnica implantada por el Servicio de Anestesia y Reanimación Pediátrica, basada en una inducción progresiva con sevoflurano hasta el 6% de volumen, en una mezcla de óxido nitroso y oxígeno, seguido por un mantenimiento con sevoflurano al 1-2% en la misma mezcla, a través de mascarilla facial o cánulas nasales, mientras el paciente respira espontáneamente¹⁸⁻²¹.

Los pacientes deberán permanecer en ayunas durante un período mínimo de 8 h en mayores de 2,5 años y 6 h en menores de 2,5 años, y para los lactantes es de aproximadamente 4 h (tabla 5).

Antes de realizar la exploración, el paciente recibe una hoja informativa de la técnica a la que se va a someter, y una hoja de consentimiento informado para la administración de contraste (gadolinio), que en el caso de pacientes pediátricos deberá ser firmada por el adulto responsable del niño.

Si se precisa sedación-anestesia, los padres reciben una hoja informativa de la razón de ésta y de los posibles riesgos asocia-

TABLA 5
TABLA DE PREPARACIÓN PARA LA ANESTESIA
EN RM CARDIOVASCULAR

- Mantener un adecuado período de ayunas
- Niños menores de 1 año
 - Ayuno de 4 h para leche materna o agua
 - Ayuno de 6 h para sólidos, leche artificial o con cereales
- Niños mayores de un año/adulto
 - Ayuno de 8 h para leche y sólidos
 - Ayuno de 6 h para agua
- Descartar posibles procesos gripales e infecciones respiratorias durante los 15 días previos
- Aportar los informes médicos del paciente, incluyendo las correcciones quirúrgicas realizadas y la medicación que esté tomando

dos. El anestesista realiza una breve historia clínica y una exploración física a todos los pacientes previa sedación, prestando especial atención a las vías aéreas y obteniendo posteriormente el correspondiente consentimiento informado.

El tipo de antena utilizada dependerá del tamaño y edad del paciente. En mayores de 10-12 kg de peso se utilizará la antena de *body phased-array* con almohadillas elevadoras que permitan colocar el dispositivo anestésico y no dificulten la respiración del niño. En neonatos y niños menores de 10 kg se utilizará la antena de cráneo, ya que nos permite una mejor adaptación al área de estudio (menor FOV).

SEGURIDAD EN RESONANCIA MAGNÉTICA Y PRINCIPALES CONTRAINDICACIONES

En los pacientes con CPC, la seguridad en RM deberá ser más exhaustiva, puesto que utilizamos gradientes más altos, se emplean cables de fibra óptica, dispositivos de monitorización, pulsioxímetros, tensiómetros y, en muchos casos, respiradores; todos ellos «RM-compatibles», aunque con posibilidad de interactuar en el campo magnético y sobre las ondas de radiofrecuencia existentes en la sala de exploración¹⁰⁻¹². Además, una importante proporción de estos pacientes se han sometido a intervenciones quirúrgicas con implantación de prótesis, clips de hemostasia y un incontable número de materiales ajenos al organismo, potenciando de forma exponencial los posibles riesgos²²⁻²⁶.

No serán contraindicación absoluta el marcapasos epicárdico residual ni las grapas y material de sutura metálica torácicos (esternales, *by-pass* o hemostasia), presentes en la mayoría de los pacientes que acuden para control posquirúrgico; tampoco lo son los *stents* intravasculares de última generación (no ferromagnéticos), aunque provocarán pérdidas de señal y artefactos de imagen, con la consiguiente dificultad diagnóstica²⁷. En estos pacientes pueden ser de utilidad las secuencias SE, ya que producirán un menor artefacto de susceptibilidad magnética, consiguiendo menos distorsión de la imagen y mayor aproximación diagnóstica.

CONTRASTES EN RESONANCIA MAGNÉTICA DE LAS CARDIOPATÍAS CONGÉNITAS

El uso de contraste unido a técnicas ultrarrápidas y a la posibilidad de obtener imágenes en 2D y 3D, aumenta la sensibilidad para evaluar la luz vascular (estenosis o aneurismas) y analizar la perfusión de los tejidos sólidos (miocardio).

En los estudios vasculares de las CPC, las dosis utilizadas oscilan entre 0,2-0,4 mmol/kg de peso. Es importante reseñar que en pacientes menores de tres años, las dosis deben de ser estrictas y administrar la menor cantidad posible (0,2 mmol/kg)^{15,28}.

En nuestra experiencia no hemos observado ninguna complicación clínica tras la administración de contraste a esta dosis.

INDICACIONES PARA LA PRÁCTICA DE UN ESTUDIO DE RESONANCIA MAGNÉTICA EN CARDIOPATÍAS CONGÉNITAS

Las indicaciones clínicas para la práctica de una RM se han dividido en cuatro categorías principales: apropiadas, aceptables, raramente justificadas y no indicadas²⁹ (tabla 6).

En nuestro centro, la angio-RM evita ya el cateterismo diagnóstico en la mayoría de casos de sospecha de anillo vascular (arco aórtico doble, arco derecho, etc.) y en los drenajes venosos anómalos sistémicos y pulmonares (parciales o completos). Ha conseguido desplazar al cateterismo en la valoración y control de la patología de arterias pulmonares y de aorta torácica, y únicamente se realiza con fines terapéuticos y para determinar presiones y oximetrías^{30,31}.

EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES ANOMALÍAS CARDIOVASCULARES MEDIANTE RESONANCIA MAGNÉTICA

Como ya se ha mencionado anteriormente, la RM nos permite llegar a una adecuada valoración anatómica del sistema cardiovascular, llevando a cabo un análisis ordenado de las cámaras cardíacas y estructuras vasculares, así como un estudio bastante detallado de la función cardíaca. En este último apartado, pretendemos desglosar con más detalle alguna de las anomalías cardiovasculares congénitas más frecuentes y las respectivas correcciones quirúrgicas (tabla 7).

ANOMALÍAS DE LA CONEXIÓN AURICULOVENTRICULAR

Atresia tricuspídea

Es la causa más común de cianosis en el período neonatal, después de la transposición de los grandes vasos (TGV). Lo normal es que no haya ninguna señal de válvula en la zona auriculo-

TABLA 6

Principales indicaciones	Resonancia magnética
Situs auricular	++
Ordenación segmentaria	+
Drenajes venosos	+++
Septo auricular	+
Membranas y bafles	++
Válvulas AV	+
Cirugía de Fontan	++
Septo ventricular	+
Función VI	++
Función VD	+++
Tracto de salida VI	+
Tracto de salida VD	+
Ramas pulmonares	+++
Hipertensión pulmonar	—
Qp/Qs	++
Fístula seno Valsalva	++
Coartación	+++
Aneurisma aórtico	+++
Anomalías de arco aórtico y anillos arteriales	+++
arteriales	
Ductus o ventana	+
Fístulas y colaterales	++
Anomalías coronarias	++
Trombosis	++
Endocarditis	—

+++; procedimiento diagnóstico de elección en la mayoría de los casos; ++; procedimiento de gran utilidad en algunos casos; +; procedimiento poco útil en la mayoría de los casos; —; procedimiento diagnóstico no indicado.

TABLA 7
EVALUACIÓN DE LAS PRINCIPALES ANOMALÍAS
CARDIOVASCULARES MEDIANTE
RESONANCIA MAGNÉTICA

Análisis de la anatomía cardiovascular
Análisis segmentario
Situs atrial
Morfología ventricular
Conexiones ventriculoarteriales
Defectos asociados y cambios posquirúrgicos
Evaluación de la función cardiovascular (volumen y fracción de eyección de ambos ventrículos)
Función sistólica ventricular
Función diastólica ventricular
Medición de la masa ventricular
Valoración de <i>shunts</i> intracardíacos izquierda-derecha
Evaluación de anomalías cardiovasculares específicas
Anomalías de drenaje venoso pulmonar o sistémico
Estenosis o hipoplasia de tronco o ramas pulmonares
Coartación de aorta nativa o posquirúrgica
Aneurismas de aorta ascendente o descendente
Anomalías del arco aórtico y anillos arteriales
Fístulas quirúrgicas y colaterales sistémicas

ventricular derecha; en raras ocasiones se observa un anillo pequeño, con hipoplasia del ventrículo derecho (VD). Lo más frecuente es que no exista TGV asociada y sí un pequeño defecto septal ventricular.

Los procedimientos quirúrgicos empleados para su corrección son el procedimiento de Glenn (anastomosis entre la vena cava

superior y la arteria pulmonar derecha o aurícula derecha) y cuando el paciente ha crecido, la operación de Fontan (anastomosis entre la vena cava inferior y la arteria pulmonar derecha, mediante tubo protésico extracardíaco) (fig. 3).

El estudio morfológico con secuencias TSE en plano axial y coronal, nos mostrará el aspecto de las cavidades cardíacas, así como la morfología de la válvula atrésica, y el anillo valvular puede estar reemplazado por grasa.

Las correcciones quirúrgicas pueden evaluarse tanto en secuencias TSE como EG, fundamentalmente en el plano coronal, lo que permitirá mostrar el tamaño de la conexión pulmonar y descartar la existencia de obstrucción del conducto. Para éste último propósito, la secuencia más importante es la angio-RM, ya que no está tan influida como las secuencias SE y EG-cine por las turbulencias de sangre que pueden provocar falsos diagnósticos³².

La angio-RM nos proporcionará un mapa vascular completo, que puede objetivar estenosis, trombosis u otras anomalías en el árbol pulmonar, aorta y en las anastomosis quirúrgicas.

El tamaño de las arterias pulmonares en pacientes intervenidos mediante procedimiento de Fontan es un dato muy importante, puesto que se considera un factor pronóstico³³.

ANOMALÍAS DE LA CONEXIÓN VENTRICULOARTERIAL

Tetralogía de Fallot

Clásicamente, las cuatro anomalías incluyen: defecto septal ventricular, acabalgamiento de la aorta, estenosis o atresia de

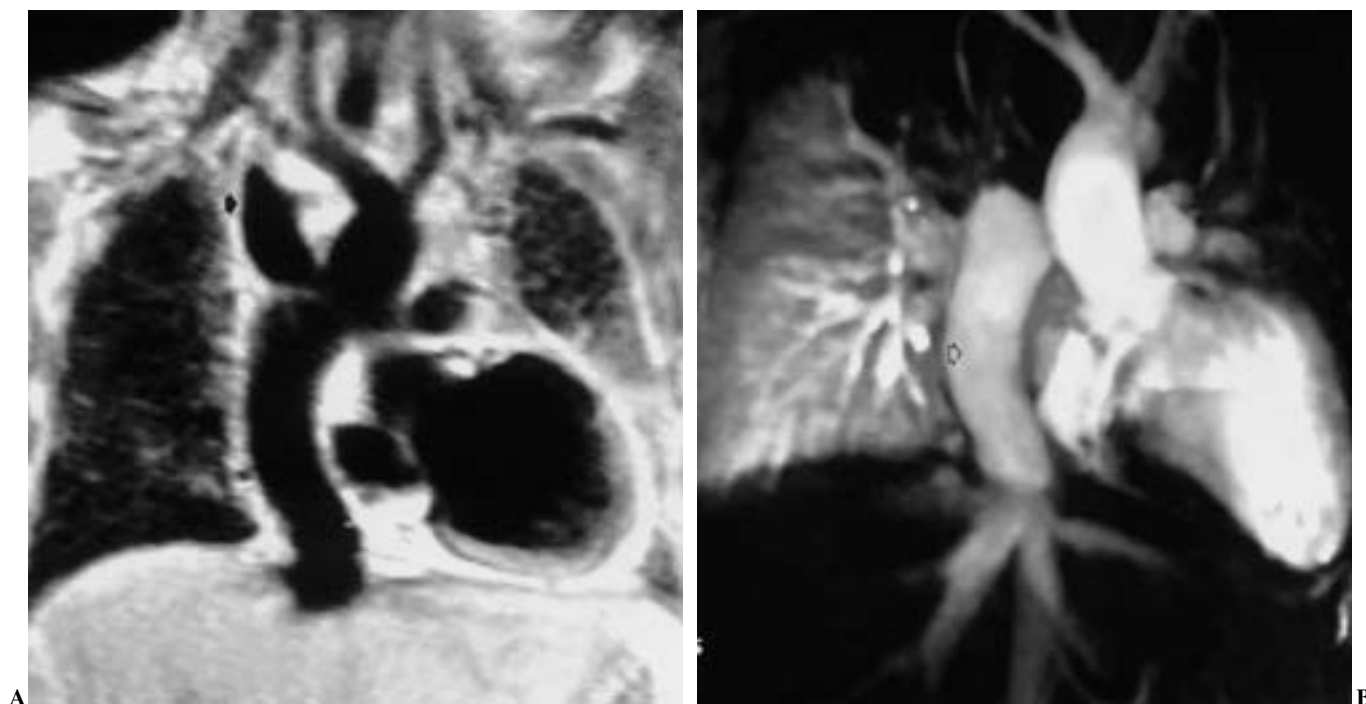


Fig. 3.—Atresia tricuspídea. RM realizada en el postoperatorio inmediato de un procedimiento de Fontan en un niño de 10 años portador de una derivación tipo Glenn, en el que se sospechaba una trombosis del injerto recién implantado. A) Secuencia HASTE coronal, donde se aprecia la permeabilidad de las correcciones quirúrgicas, tanto el Glenn (flecha) como el tubo extracardíaco implantado (Fontan). B) En el estudio angio-RM con reconstrucción VRT 3D se demuestra la permeabilidad del Fontan (flecha).

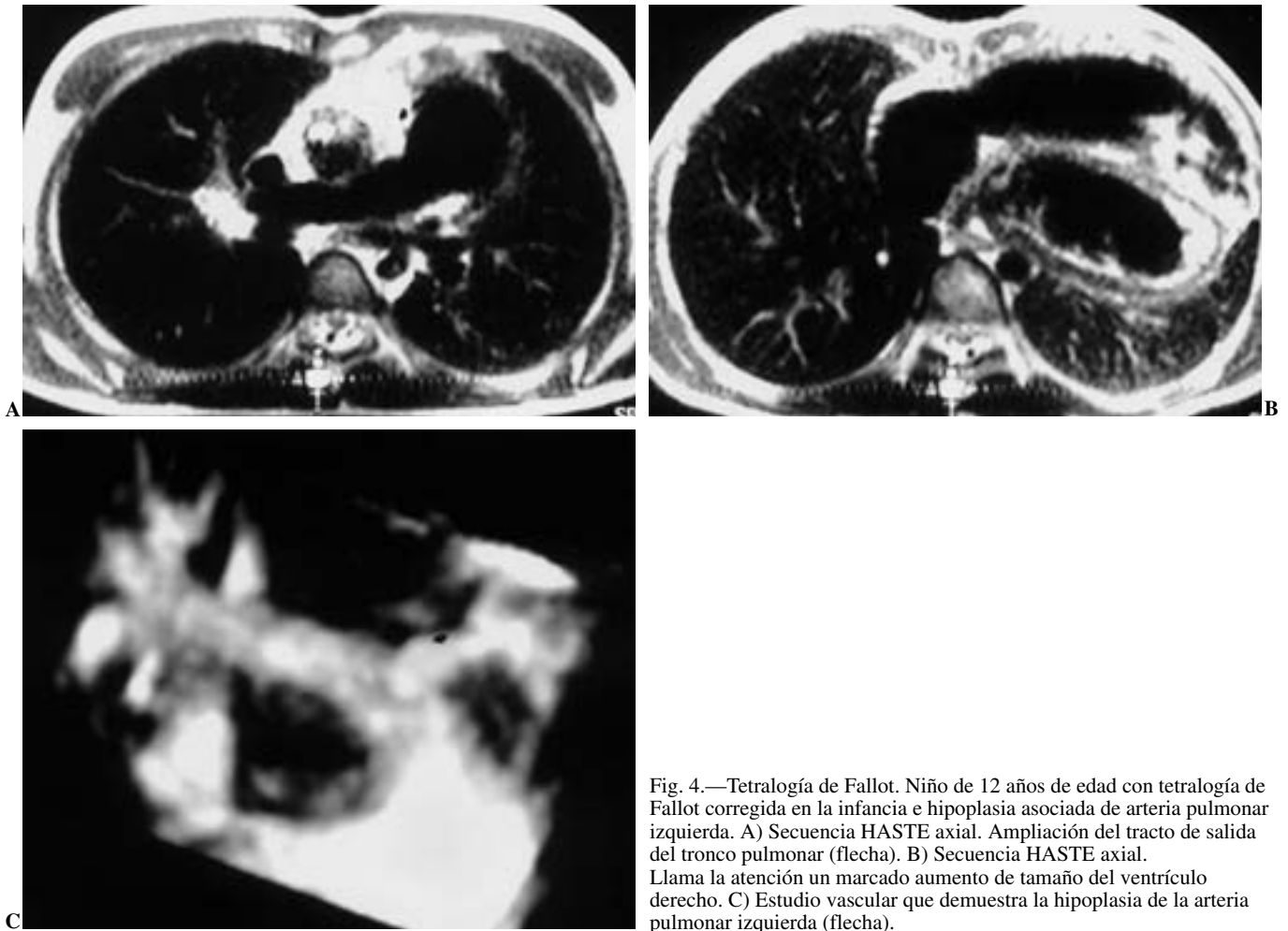


Fig. 4.—Tetralogía de Fallot. Niño de 12 años de edad con tetralogía de Fallot corregida en la infancia e hipoplasia asociada de arteria pulmonar izquierda. A) Secuencia HASTE axial. Ampliación del tracto de salida del tronco pulmonar (flecha). B) Secuencia HASTE axial. Llama la atención un marcado aumento de tamaño del ventrículo derecho. C) Estudio vascular que demuestra la hipoplasia de la arteria pulmonar izquierda (flecha).

salida del VD e hipertrofia ventricular derecha (fig. 4). El protocolo de estudio incluye secuencias TSE con sincronismo cardíaco con cortes axiales (5-7 mm de grosor) que abarque la silueta cardíaca y los hilos pulmonares. El infundíbulo y el anillo pulmonar se visualizarán mejor en plano sagital oblicuo.

El procedimiento quirúrgico de elección consiste en la ampliación del tracto de salida del VD con interposición de parche protésico. Los procedimientos quirúrgicos paliativos son el cortocircuito de Blalock-Taussig modificado (anastomosis entre arteria subclavia y arteria pulmonar izquierda), procedimiento de Glenn y el definitivo tipo Rastelli (unión del tracto de salida del VD con tronco de la arteria pulmonar con tubo protésico) (fig. 5).

Tanto las correcciones quirúrgicas como las colaterales arteriales sistemicopulmonares se pueden evaluar con bastante precisión mediante secuencias EG en plano axial y sobre todo, mediante angio-RM con reconstrucciones tridimensionales.

Las secuencias cine-EG en plano en eje corto se utilizan para calcular la masa, función y fracción de eyección ventricular derecha, así como volúmenes cardíacos, frecuentemente afectados en esta anomalía.

PATOLOGÍA AÓRTICA

Válvula aórtica bicúspide

Las anomalías valvulares pueden coexistir con frecuencia en las CPC, ya sea como una malformación o como consecuencia de un tratamiento quirúrgico. La ventaja de la RM es que puede utilizarse tanto para estudio morfológico como para la valoración funcional de éstas. Estas anomalías (estenosis o insuficiencia), son cuantificables mediante análisis de flujo con secuencias de contraste de fase (PC) codificadas con la velocidad, lo que nos permite calcular velocidad máxima, flujo de la estenosis, gradientes de presión y, por tanto, severidad de la estenosis o flujo regurgitado en caso de insuficiencia.

Una válvula bicúspide no da síntomas si no está estenótica. El problema es que casi invariablemente con el paso del tiempo se engruesa y calcifica, provocando una estenosis significativa. Las valvas son casi siempre de tamaño desigual, presentando la mayor un rafe medio rudimentario que la divide por la mitad (fig. 6).

Estenosis supravalvular

Es la forma menos frecuente de obstrucción. Se caracteriza básicamente por la existencia de un estrechamiento del tracto de

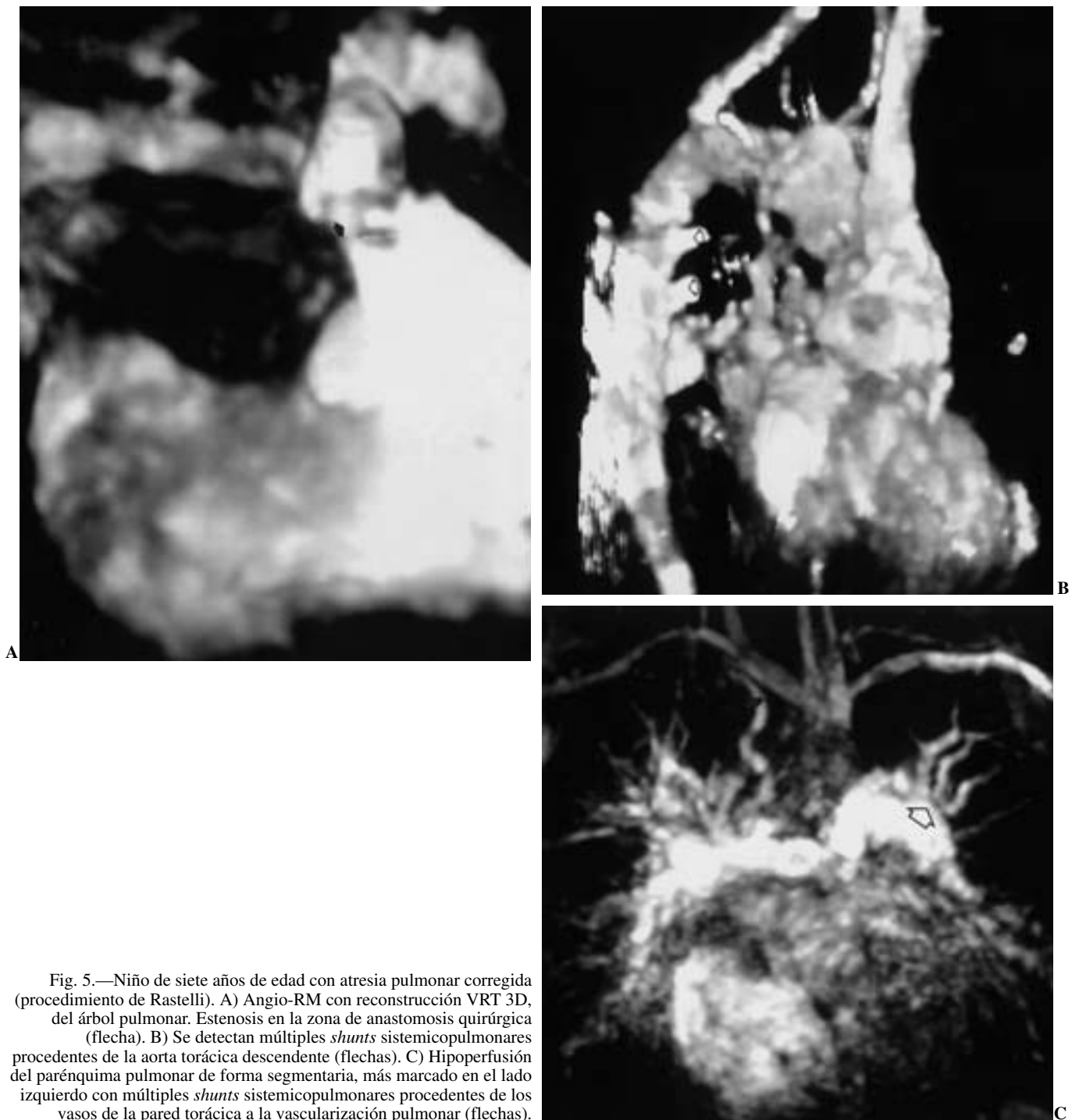


Fig. 5.—Niño de siete años de edad con atresia pulmonar corregida (procedimiento de Rastelli). A) Angio-RM con reconstrucción VRT 3D, del árbol pulmonar. Estenosis en la zona de anastomosis quirúrgica (flecha). B) Se detectan múltiples *shunts* sistemicopulmonares procedentes de la aorta torácica descendente (flechas). C) Hipoperfusión del parénquima pulmonar de forma segmentaria, más marcado en el lado izquierdo con múltiples *shunts* sistemicopulmonares procedentes de los vasos de la pared torácica a la vascularización pulmonar (flechas).

salida del ventrículo izquierdo (VI). Existen tres formas de obstrucción supravalvular desde el punto de vista anatómico: localizado o en reloj de arena, membrana fibrosa por encima de los senos de Valsalva e hipoplasia tubular difusa de aorta ascendente y troncos supraaórticos. Las coronarias surgen por debajo de la obstrucción con hipertensión y arteriosclerosis.

Las secuencias TSE sagitales oblicuos y axiales con cortes finos nos permiten visualizar la morfología de la aorta y medir el diámetro de la estenosis. Asimismo, el estudio de flujo nos muestra el gradiente de presión existente en la zona estenótica.

Atresia aórtica

La válvula aórtica es atrésica o está muy estenótica y la aorta ascendente es hipoplásica, y únicamente sirve para irrigar las arterias coronarias. La aorta descendente está alimentada por un *ductus* arterioso permeable y el VI suele ser hipoplásico o incluso faltar. La cirugía que se emplea para corregir esta anomalía es la llamada corrección tipo Norwood (figs. 7 y 8).

La valoración de esta técnica quirúrgica es con angio-RM y reconstrucciones 3D, dada la complejidad de la anatomía vascular.

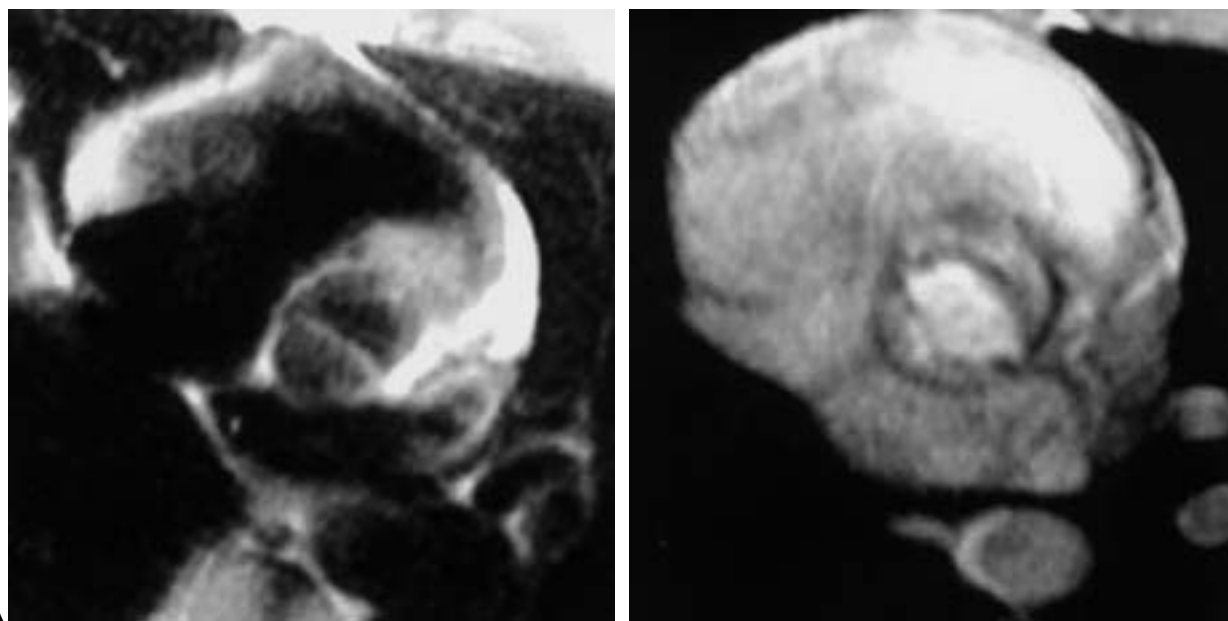


Fig. 6.—Válvula aórtica bicúspide. Niño de 10 años de edad con coartación de aorta tipo posductal, además de una válvula aórtica bicúspide asintomática asociada. A) Secuencia TSE con sincronismo cardíaco, con valvas cerradas (diástole). B) Secuencia EG en modo cine, con valvas abiertas, sístole ventricular.

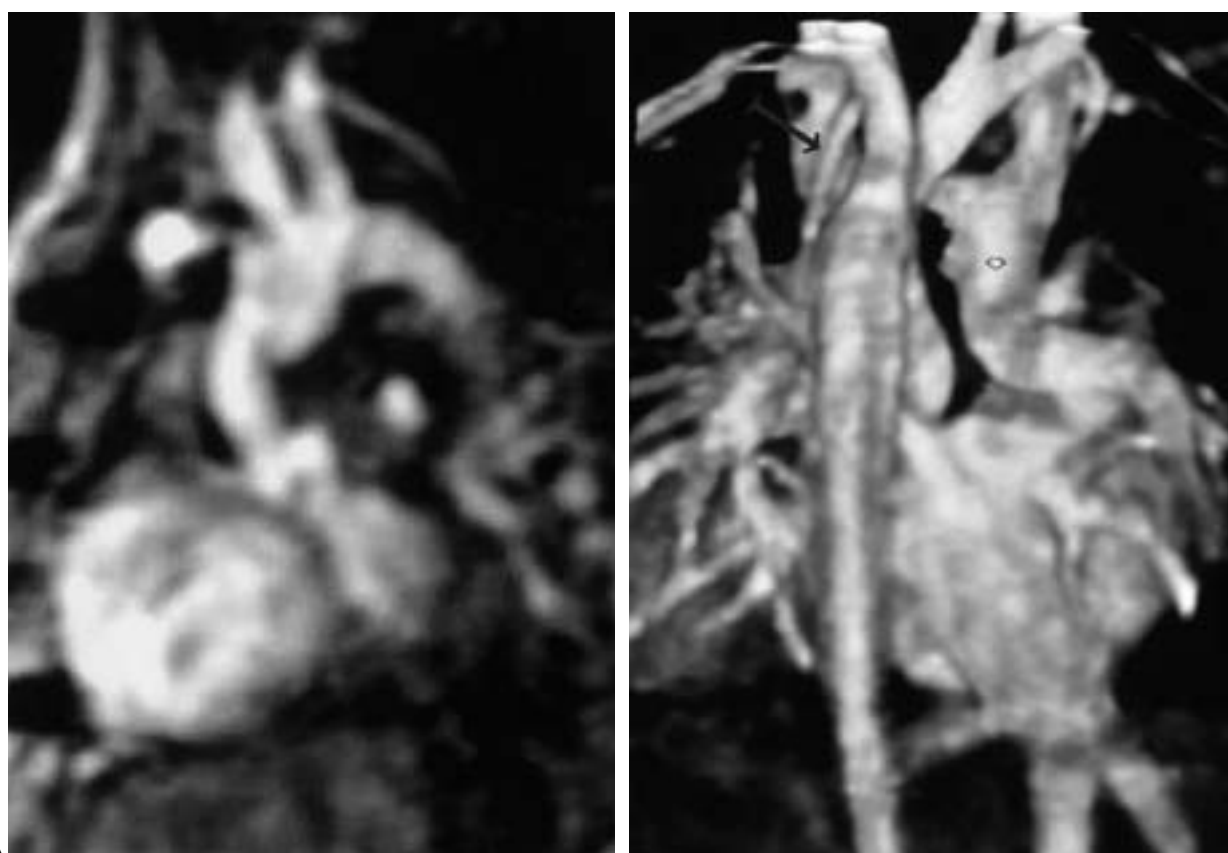


Fig. 7.—Atresia aórtica. Niño de cinco años de edad sometido a corrección quirúrgica con procedimiento de Norwood después del nacimiento. A) Angio-RM que muestra la morfología típica de estos pacientes con hipoplasia de la aorta ascendente, con arco aórtico y aorta descendente normo-desarrollados por irrigación a través del *ductus* que permitió su crecimiento en época fetal. B) El estudio angio-RM de control para valorar la atresia aórtica y el estado pulmonar, demostró una ausencia de convergencia central entre ambas ramas pulmonares y la persistencia de permeabilidad del Glenn (flecha abierta) y del injerto Blalock-Taussig (flecha).



Fig. 8.—Atresia aórtica en niña de dos años y medio de edad con hipoplasia de VI y de aorta ascendente, en tratamiento con uroquinasas por trombosis aguda de arteria pulmonar izquierda (API). Se realizó estudio angio-RM 3D urgente para valorar la posible resolución de la trombosis después de dos días. A) Corrección tipo Norwood y Glenn (flechas abiertas). Aorta atrésica nativa (flecha). B) Defecto intraluminal en la arteria pulmonar principal izquierda, con desconexión de ambas ramas pulmonares (flecha). C) Estudio angiográfico convencional con el que se hizo el diagnóstico inicial. Se puede ver que ésta es superponible al estudio de angio-RM. D) Posteriormente se realizó cirugía paliativa de la trombosis mediante anastomosis entre aorta descendente y API (técnica de Potts) con tubo de dacron (flecha).

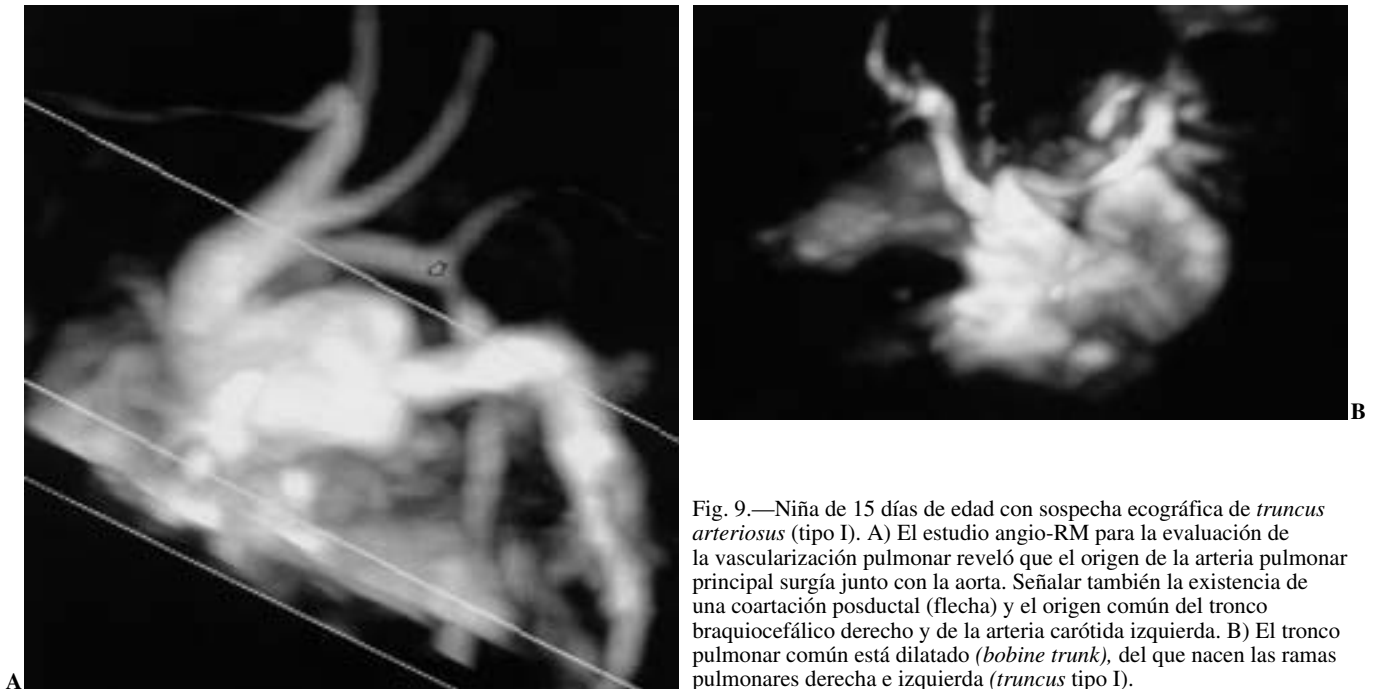


Fig. 9.—Niña de 15 días de edad con sospecha ecográfica de *truncus arteriosus* (tipo I). A) El estudio angio-RM para la evaluación de la vascularización pulmonar reveló que el origen de la arteria pulmonar principal surgía junto con la aorta. Señalar también la existencia de una coartación posductal (flecha) y el origen común del tronco braquiocéfálico derecho y de la arteria carótida izquierda. B) El tronco pulmonar común está dilatado (*bobine trunk*), del que nacen las ramas pulmonares derecha e izquierda (*truncus* tipo I).

lar y de las posibles variaciones. La identificación de los diferentes vasos mediante secuencias SE se hará en los planos axial y coronal principalmente.

Transposición de grandes vasos (TGV)

— *Completa*. El tronco de la arteria pulmonar se origina del VI y la aorta del VD, cuando la conexión A-V es armónica. La aorta se sitúa anterior a la arteria pulmonar principal. Para que el paciente pueda sobrevivir han de existir otras anomalías asociadas, como la CIV (33%), CIA o persistencia del conducto arterioso.

— *Corregida*. Las grandes arterias sufren transposición cuando existe una conexión A-V no armónica. El tronco de la arteria pulmonar se origina del VI desde el punto de vista morfológico, que a su vez está conectado a la aurícula derecha mediante una válvula mitral. La aorta se origina del VD, el cual se conecta con la aurícula izquierda a través de una válvula tricúspide. Puede asociarse además a CIV, anomalía de Ebstein, atresia pulmonar, anomalías de conducción A-V, etc.

La técnica quirúrgica descrita en la década de 1970 es la técnica de Mustard y Senning, con redirección de la circulación venosa a las respectivas aurículas. En esta cirugía se mantiene el ventrículo derecho con circulación sistémica. El fallo ventricular derecho es la complicación más frecuente en la evolución de estos enfermos (fig. 10). El seguimiento de este tipo de cirugía podrá realizarse en un plano coronal, que nos mostrará el canal venoso superior, que es el lugar más frecuente de estenosis posquirúrgica. Los planos sagital y axial permitirán detectar obstrucción del retorno venoso pulmonar o estenosis en la conexión entre la porción dorsal y ventral de la aurícula.

Entre otras opciones, las secuencias EG permitirán la monitorización de la masa, volumen del ventrículo derecho, fracción de eyección, y con las secuencias en modo cine veremos el grado de regurgitación tricúspide, tanto cualitativa como semicuantitativamente³³.

La intervención de *switch* o Jatene (intercambio) restablece la concordancia ventriculoarterial, y en la actualidad es la técnica de corrección preferida y es aplicable a todos los tipos de TGV en neonatos, con excelentes resultados. Las complicaciones más frecuentes incluyen: estenosis supraavicular de neoarteria pulmonar y dilatación de neoarteria ascendente (fig. 11).

La RM ha demostrado tener un papel más importante en el seguimiento a largo plazo de los pacientes intervenidos mediante esta técnica quirúrgica, y puede valorar diferentes complicaciones que incluyen fugas, obstrucciones venosas, sistémicas o pulmonares, obstrucción del tracto de salida del VI, regurgitación tricúspide. Los planos axial SE y la angio-RM nos mostrarán la anatomía de los grandes vasos.

Tronco arterial común (*truncus arteriosus*)

Se define esta entidad cuando una sola arteria sale del corazón a través de una válvula común, que puede tener de dos a cinco valvas, en situación craneal a una CIV para abastecer a las arterias de las circulaciones general, pulmonar y coronaria.

Hay cuatro tipos de tronco común. El tipo I es el tipo más frecuente y se caracteriza por la separación parcial del tronco común, formando un vestigio del tronco de la pulmonar, del que se originan las arterias pulmonares (fig. 9). En los tipos II a IV, las arterias pulmonares tienen su origen en la aorta torácica: II, conjuntas en aorta ascendente; III, separadas a ambos lados de la aorta ascendente; IV, varias ramas colaterales con origen en cualquier localización de la aorta torácica.

Las secuencias SE en proyección axial puede definir la morfología del *truncus* y de las ramas pulmonares, mientras que las proyecciones sagital y coronal nos ayudarán a determinar el origen de esas ramas. Además, se podrá visualizar la morfología del ventrículo, tamaño y grosor de la pared y otras anomalías asociadas como CIV, arco aórtico derecho, interrupción del arco

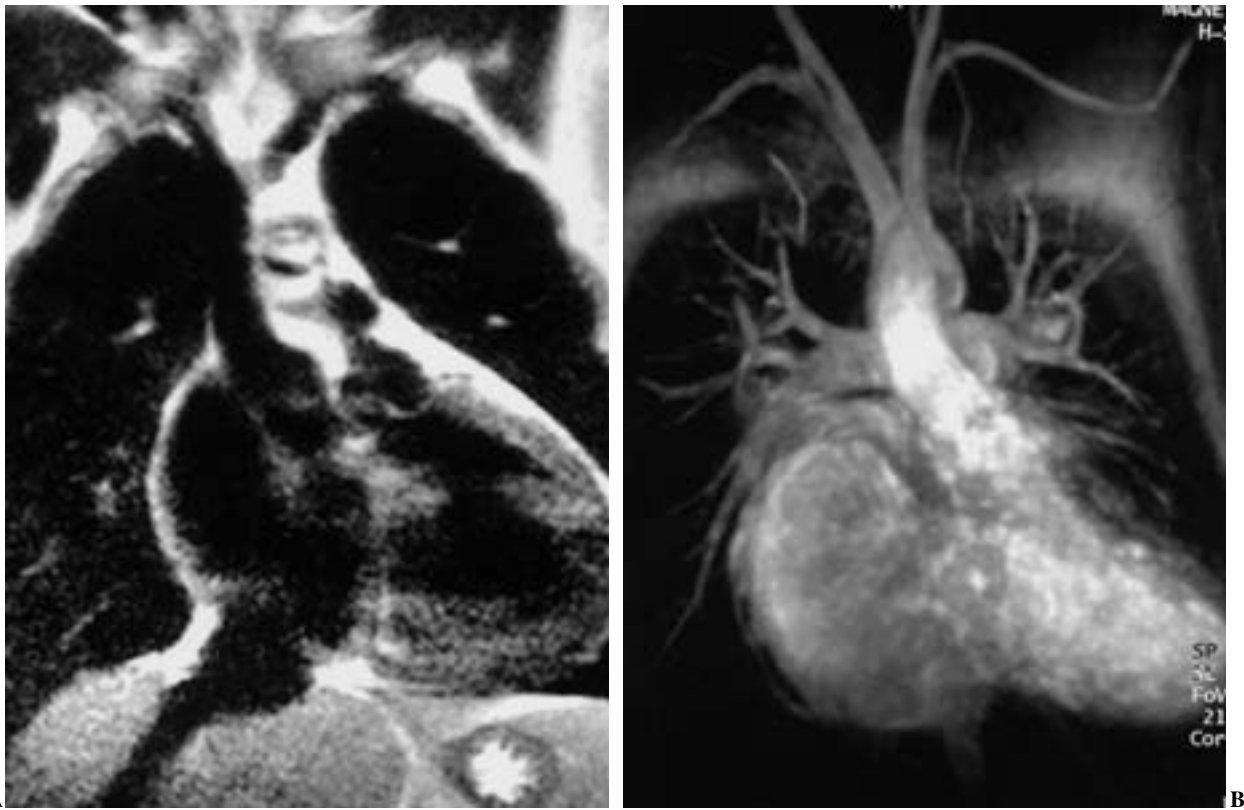


Fig. 10.—Transposición completa de grandes vasos (TGV) en niño de 14 años de edad sometido a procedimiento quirúrgico correctivo de Mustard-Senning a temprana edad. A) Secuencia HASTE coronal que muestra el neoconducto del retorno venoso derecho y, en situación posterior, una porción de la neaurícula izquierda. B) Angio-RM, reconstrucción 3D MIP. Se observa la configuración esférica del ventrículo derecho y la situación de los troncos principales en un plano anteroposterior.

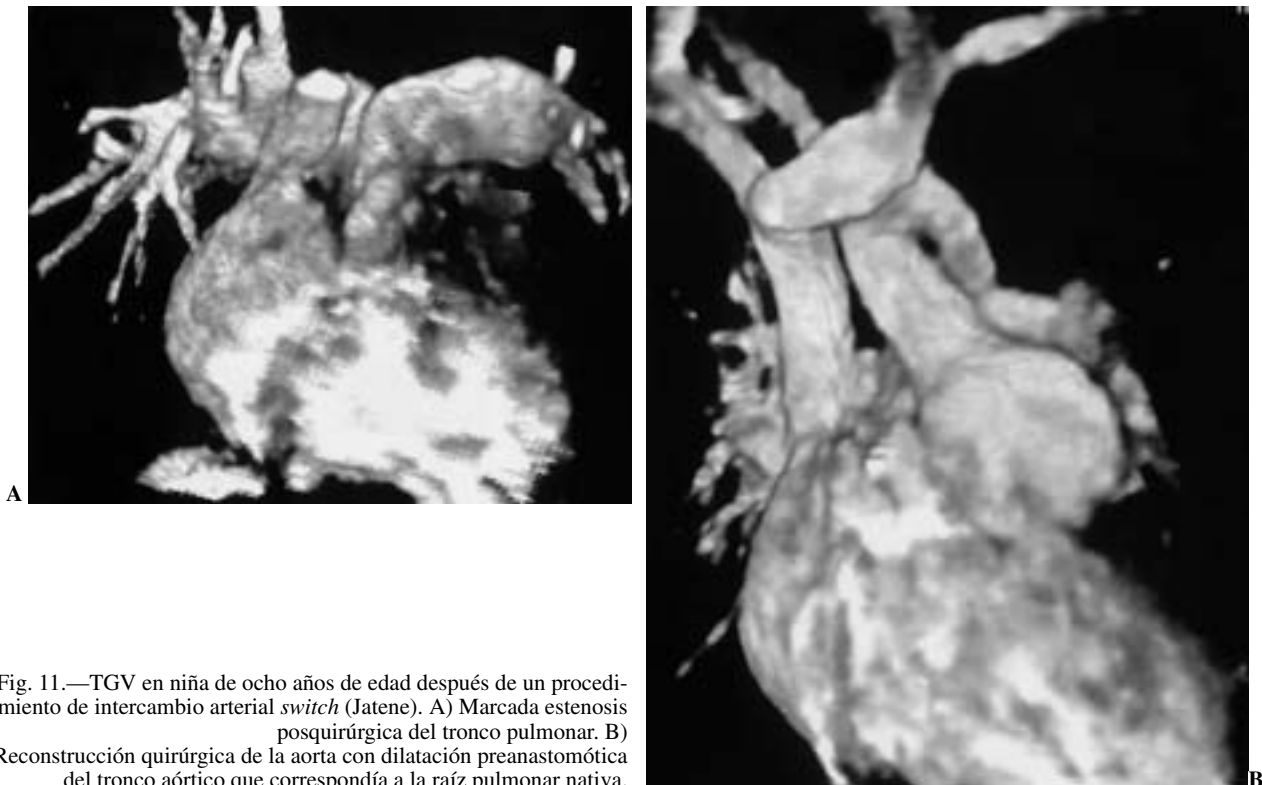


Fig. 11.—TGV en niña de ocho años de edad después de un procedimiento de intercambio arterial *switch* (Jatene). A) Marcada estenosis posquirúrgica del tronco pulmonar. B) Reconstrucción quirúrgica de la aorta con dilatación preanastomótica del tronco aórtico que correspondía a la raíz pulmonar nativa.

aórtico, etc. Estas secuencias asociadas a la angio-RM 3D podrán definir la anatomía vascular con gran precisión, permitiendo un buen planteamiento quirúrgico.

Coartación de aorta

Es la tercera malformación cardíaca congénita más frecuente (4/10.000 recién nacidos). Consiste en un estrechamiento de la aorta descendente en la proximidad del conducto arterioso, que puede ser persistente. Esta estenosis provoca una disminución del flujo sanguíneo en la aorta descendente, con formación de vasos colaterales dependiendo del grado de estenosis.

— Coartación preductal (difusa o tipo infantil).

— Coartación posductal (localizada o tipo adulto), más frecuente.

Entre las lesiones asociadas se incluyen: hipoplasia del arco aórtico, estenosis o anomalías de válvula aórtica (válvula bicúspide), etc.

La utilidad de la RM en el estudio de la coartación de aorta está bien establecida, puede calcular los diámetros vasculares, valoración de ramas colaterales, detectar anomalías de flujo, así como realizar un estudio de flujo transcoartación mediante una secuencia PC posicionada en la misma dirección o perpendicular al vaso. Esto nos permite calcular el gradiente existente mediante un cálculo aproximado basado en la ecuación de Bernouilli:

$$\text{gradiente de presión} = K \times (V \max)^2$$

siendo K una constante, generalmente $= 4^{15,34}$.

La realización de estudios angio-RM 3D nos permiten estudiar lesiones en pacientes neonatos y detectar anomalías cardiovasculares asociadas, evitando en muchos casos el cateterismo.

La principal complicación de su corrección es la hipertensión arterial, la recoartación y los aneurismas, que van a condicionar la realización de controles de imagen evolutivos (fig. 12).

CONCLUSIÓN

La introducción de secuencias morfológicas rápidas, la mejora de equipos, el sincronismo cardíaco y las secuencias vasculares con contraste, han hecho que la RM se convierta en un método diagnóstico de gran importancia en el estudio y seguimiento de pacientes con cardiopatías congénitas complejas.

La angio-RM 3D con gadolinio se está convirtiendo en una poderosa herramienta diagnóstica inocua, pues evita la radiación de la angiografía convencional y el riesgo de la cateterización.

Es imprescindible una adecuada coordinación entre radiólogos y equipos medicoquirúrgicos para lograr un adecuado manejo en estos pacientes.

Como es de suponer, sigue siendo necesaria la realización de ETT, ETE o cateterismo de cribado en los casos muy complejos, en donde cualquier información aportada de forma inocua parece poca, así como en la valoración de las cámaras, tabiques, válvulas y patología morfológica cardíaca. Si bien, en un futuro no muy lejano estaremos en vías de ofrecer al clínico la posibilidad de realizar estudios de RM tan completos que permitan dar toda la información requerida en una sola exploración diagnóstica.

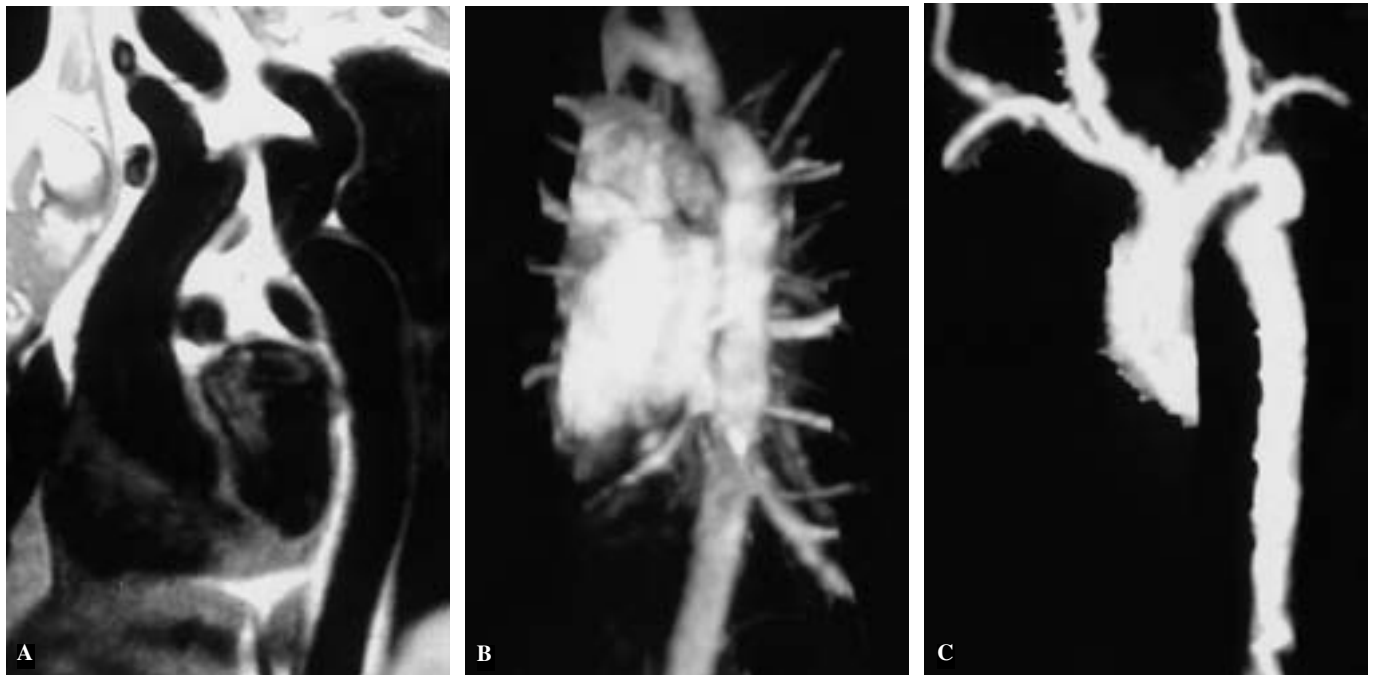


Fig. 12.—Coartación de aorta. A) Coartación de aorta posductal en paciente de 28 años de edad. Secuencia SE sagital oblicua. Imagen típica con cambio de dirección (*kinking*) en aorta transversa y ligera dilatación postestenótica en aorta descendente. B) Niño de seis años de edad con coartación posductal corregida. La angio-RM mostró una recoartación inmediatamente distal al origen de la arteria subclavia izquierda. C) Niño de cuatro años de edad con coartación preductal corregida quirúrgicamente (angioplastia con parche). La angio-RM 3D reveló una hipoplasia tubular de un gran segmento de arco aórtico después del origen del tronco braquiocefálico.

AGRADECIMIENTO

Nuestro mayor agradecimiento a los Dres. N. Gómez-León, F. Moreno y a los componentes del Servicio de Cardiología Infantil del Hospital La Paz, la Unidad de cardiopatías congénitas del adulto (UMQ-Cardiología, Hospital General) y del Servicio de Cirugía Cardíaca Infantil por la confianza depositada en el equipo de RM cardiovascular y por su constante ayuda y colaboración, sin los cuales no hubiera sido posible su instauración y desarrollo en este hospital.

BIBLIOGRAFÍA

- Nugent EW, Plauth EW Jr, Edwards JE, Schlant RC, Williams WH. En: Hurst JW, editor. *Congenital heart disease. The heart*. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1986; p. 580-728.
- Oliver Ruiz JM. Cardiopatías congénitas del adulto: residuos, secuelas y complicaciones de las cardiopatías congénitas operadas en la infancia. *Rev Esp Cardiol* 2003;56:73-88.
- Oliver Ruiz JM, Mateos García M, Bret Zurita M. Evaluación de las cardiopatías congénitas en el adulto. *Rev Esp Cardiol* 2003;56:607-20.
- Higgins CB. Congenital heart disease. En: Higgins CB, Hricak H, Helms CA, editors. *Magnetic Resonance Imaging of the body*. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott-Raven, 1997. p. 461-518.
- Varaprasathan GA, Araoz PA, Higgins CB, Reddy GP. Quantification of flow dynamics in congenital heart disease: applications of velocity-encoded cine MR imaging. *Radiographics* 2002;22:895-905; discussion: 905-6.
- Petersen SE, Voigtlander T, Kreitner KF, Kalden P, Wittlinger T, Scharhag J, et al. Quantification of shunt volumes in congenital heart diseases using a breath-hold MR phase contrast technique—comparison with oximetry. *Int J Cardiovasc Imaging* 2002;18:53-60.
- Task Force of the European Society of Cardiology, in collaboration with the association of European Pediatric Cardiologists. The clinical role of magnetic resonance in cardiovascular disease. *Eur Heart J* 1998;19:19-39.
- Roos A, Roest AW. Evaluation of congenital heart disease by magnetic resonance imaging. *Eur Radiol* 2000;10:2-6.
- Kersting-Sommerhoff BA, Diethelm L, Teitel DF, et al. Magnetic resonance imaging of congenital heart disease: sensitivity and specificity using receiver operating characteristic curve analysis. *Am Heart J* 1989;118:155.
- Budinger TF. Nuclear Magnetic Resonance (NMR) in vivo studies: known thresholds for health effects. *J Comput Assist Tomogr* 1981;5:800.
- Shellock FG, Crues JV. MRI: safety considerations in magnetic resonance imaging. *MRI decisions* 1988;5:243.
- Beers J. Biological effects of weak electromagnetic fields from 0 Hz to 200 MHz: a survey of the literature with special emphasis on possible magnetic resonance effects. *Mag Reson Imaging* 1989;7:309.
- Kangarlu A, Shellock FG, Chakeres DW. 8.0 Tesla human MR system: temperature changes associated with radiofrequency-induced heating of a head phantom. *J Magn Reson Imaging* 2003;17:220-6.
- Shellock FG, Shellock VJ. Cardiovascular catheters and accessories: ex vivo testing of ferromagnetism, heating, and artifacts associated with MRI. *J Magn Reson Imaging* 1998;8:1338-42.
- Helbing WA, Niezen RA, De Roos A. Congenital heart disease. En: Bogaert J, Duerinckx AJ, Rademakers FE, editors. *Magnetic resonance of the heart and great vessels*. 1st ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1999-2000; p. 39-57.
- Holmqvist C, Larsson EM, Stahlberg F, Laurin S. Contrast-enhanced thoracic 3D-MR angiography in infants and children. *Acta Radiol* 2001;42:50-8.
- Okuda S, Kikinis R, Geva T, Chung T, Dumanli H, Powell AJ. 3D-shaded surface rendering of gadolinium-enhanced MR angiography in congenital heart disease. *Pediatr Radiol* 2000;30:540-5.
- Sanabria P, Hajro M, Jiménez E, Altit E, Nodal A, Lahoz A. Anestesia con sevoflurano para exploraciones de resonancia magnética en pediatría. *Rev Esp Anestesiol Reanim* 2002;49:184-90.
- Keengwe IN, Hegde S, Dearlove O, et al. Structured sedation programme for magnetic resonance imaging examination in children. *Anaesthesia* 1999;54:1069-72.
- Peden CJ, Menon DK, Hall AS, et al. Magnetic resonance for the anaesthetist. Part II: anaesthesia and monitoring in MR units. *Anaesthesia* 1992;47:502-17.
- Sanabria P, Altit E, Lahoz A, et al. Método para disminuir la contaminación ambiental de gases anestésicos en anestesia pediátrica. *Rev Esp Anestesiol Reanim* 2002;49:184-90.
- Ahmed S, Shellock FG. Magnetic resonance imaging safety: implications for cardiovascular patients. *J Cardiovasc Magn Reson* 2001;3:171-82.
- Shellock FG, Kanal E. *Magnetic resonance: bio-effects, safety, and patient management*. 2nd ed. New York: Lippincott-Raven, 1996.
- Kanal E, Borgstede JP, Barkovich AJ, et al. American College of Radiology white paper on MR safety. *AJR Am J Roentgenol* 2002;178:1335-47.
- Shellock FG, Crues JV. MR safety and the American College of Radiology white paper. Commentary. *AJR Am J Roentgenol* 2002;178:1349-52.
- Sawyer-Glover AM, Shellock FG. Pre-MRI procedure screening recommendations and safety considerations for biomedical implants and devices. *J Magn Reson Imaging* 2000;12:92-106.
- Shellock FG. Pocket guide to metallic implants and MR procedures: update 2000. 7th ed. New York: Lippincott-Raven Healthcare, 2001; p. 1-159.
- Martí-Bonmatí L, Vega T, Benito C, et al. Safety and efficacy of Omniscan (gadodiamide injection) at 0,1 mmol/kg for MRI in infants younger than 6 months of age: phase III open multicenter study. *Invest Radiol* 2000;35:141-7.
- Pons G, Carreras F, Castro A, Ferreirós J, Iñiguez A, Jiménez LJ, et al. Guías de práctica clínica de la Sociedad Española de Cardiología en Resonancia Magnética. *Rev Esp Cardiol* 2000;53:542-59.
- Geva T, Greil GF, Marshall AC, Landzberg M, Powell AJ. Gadolinium-enhanced 3-dimensional magnetic resonance angiography of pulmonary blood supply in patients with complex pulmonary stenosis or atresia: comparison with x-ray. *Circulation* 2002;106:473-8.
- Greil GF, Powell AJ, Gildein HP, Geva T. Gadolinium-enhanced three-dimensional magnetic resonance angiography of pulmonary and systemic venous anomalies. *J Am Coll Cardiol* 2002;39:335-41.
- Sharma S, Ensley AE, Hopkins K, et al. In vivo flow dynamics of the total cavopulmonary connection from three-dimensional multislice magnetic resonance imaging. *Ann Thorac Surg* 2001;71:889-98.
- Wytenbach R, Bremerich J, Higgins CB. Cardiovascular Magnetic Resonance of complex congenital heart disease in the adult. En: Manning WJ, Pennell DJ, editors. *Cardiovascular Magnetic Resonance*. New York: Churchill Livingstone, 2002; p. 311-23.
- Rupprecht T, Nitz W, Wagner M, et al. Determination of the pressure gradient in children with coarctation of the aorta by low-field magnetic resonance imaging. *Pediatr Cardiol* 2002;23:127-31.