

Lucia Manganaro, Marco Di Maurizio, Sara Savelli

Parole chiave

Richiami embriologici cardiovascolari • Circolazione fetale • Metodica di acquisizione e sequenze RM • Correlazione con scansioni ecocardiografiche • Piani di scansione trasversali, sagittali e obliqui

La RM permette di visualizzare le principali strutture cardiovascolari fetali e negli ultimi anni, grazie all'impiego di sequenze ultrafast, che consentono lo studio morfologico e dinamico (sequenze GRE, SSFP e di sequenze real-time cineRM con SSFP), è stata proposta nella valutazione di alcune malformazioni cardiache.

8.1 Richiami embriologici

8.1.1 Cuore

Il sistema cardiovascolare origina dal foglietto germinale mesodermico. Il cuore consta inizialmente di strutture tubulari appaiate, che al 22° giorno di sviluppo (l'embrione ha una lunghezza di 2,5-3 mm) formano un tubo cardiaco singolo, costituito da un tubo endocardico interno e da un mantello mio-epicardico circostante; in questa fase l'organo si connette al sistema di archi in via di sviluppo, alle vene vitelline e ombelicali. Il secondo stadio

di sviluppo cardiaco inizia con la formazione dell'ansa atrio-ventricolo-bulbare. La porzione craniale del tubo cardiaco si flette ventralmente e verso destra, mentre la parte atriale caudale inizia a curvarsi in direzione dorso-craniale e verso sinistra, così da formare un'ansa. Progressivamente si forma un atrio comune che entra nella cavità pericardica, trascinando i segmenti destro e sinistro del seno venoso: si forma il canale atrioventricolare, che connette l'atrio comune ai ventricoli embrionali primitivi. Intorno ai 28 giorni si ritiene inizino le contrazioni nella porzione ventricolo-bulbare del cuore e il battito cardiaco. La circolazione avviene tramite il seno venoso verso l'atrio destro, l'atrio sinistro e, successivamente, nel canale atrioventricolare e nei ventricoli. Nel corso del terzo stadio dello sviluppo cardiaco, si riassorbono il bulbo cardiaco e il seno venoso. In questa fase l'ansa atrio-ventricolo-bulbare inizia a detorcersi e si sviluppano i setti cardiaci, formando un cuore a quattro camere. La formazione dei setti all'interno del cuore, tra il 27° e 37° giorno di sviluppo, deriva dallo sviluppo dei cuscinetti endocardici nel canale atrioventricolare e nella regione tronco-conale. Il *septum primum*, che si estende dal tetto dell'atrio, non divide completamente l'atrio in due, ma lascia pervio l'*ostium primum* che permette la comunicazione tra le due camere. Alla chiusura dell'*ostium primum*, per la fusione del *septum*

L. Manganaro (✉)
Dipartimento di Scienze Radiologiche,
Oncologiche e Anatomico-Patologiche
Policlinico Umberto I
"Sapienza" Università di Roma
Roma
e-mail: lucia.manganaro@uniroma1.it

primum con i cuscinetti endocardici, si apre l'*ostium secundum* nel contesto dello stesso *septum primum*, successivamente chiuso dal *septum secundum*. Il forame ovale rimarrà pervio fino alla nascita, quando all'aumento della pressione nell'atrio sinistro i due setti tenderanno a giustapporsi fino a chiudere la comunicazione interatriale. La formazione dei setti nel canale atrioventricolare avviene quando si fondono i due grandi cuscinetti endocardici, formando un orificio atrioventricolare destro (tricuspide) e uno sinistro (mitrale), di solito intorno al 33° giorno di sviluppo. Il setto interventricolare e la sua porzione muscolare si formano entro la fine della 7ª settimana di sviluppo, per la fusione delle pareti mediali giustapposte dei due rigonfiamenti conali destro e sinistro dilatati. Durante l'8ª settimana di sviluppo, i cuscinetti del cuore primitivo durante la crescita finiscono per avvatarsi l'uno all'altro fino a formare il setto aortico polmonare, che divide il tronco arterioso nel canale aortico e in quello polmonare. Contemporaneamente, lo sviluppo e la fusione dei cuscinetti del cono cardiaco formano il setto aortico-polmonare, che divide il cono in una porzione antero-laterale (efflusso ventricolare destro) e in una porzione postero-mediale (efflusso ventricolare sinistro). Successivamente, la comunicazione residuale tra i due ventricoli si chiude per la fusione tra setto del cono e il tessuto dei cuscinetti endocardici inferiori lungo la sommità del setto interventricolare muscolare, che diviene la parte membranosa del setto interventricolare. Tra la 5ª e la 7ª settimana di sviluppo avviene la formazione delle valvole semilunari aortica e polmonare.

8.1.2 Archi aortici

Durante la 4ª e la 5ª settimana di sviluppo si formano sei paia di arterie originanti dalla parte più distale del tronco arterioso. Queste vengono denominate archi aortici. Gli archi aortici costituiscono delle comunicazioni tra il sacco aortico e le due aorte dorsali.

Il primo e secondo paio di archi scompaiono mentre si forma il terzo paio, quando l'embrione è lungo circa 4 mm (giorno 24-25). Le aorte dorsali, al di là delle estremità dorsali del terzo paio di archi, persistono come arterie carotidi interne. Le arterie carotidi esterne originano da questi archi, che si uniscono al sacco aortico a formare le arterie carotidi comuni. Quando l'embrione è lungo circa 14 mm (giorno 36-42), l'aorta dorsale tra il terzo e il quarto paio di archi si atrofizza, così come l'aorta dorsale destra tra l'arteria succlavia e l'aorta dorsale comune, scompare. Il quarto arco sinistro e l'aorta dorsale comune divengono l'aorta definitiva e il quarto arco destro diventa la parte prossimale dell'arteria succlavia destra. A questo stesso stadio (quando l'embrione è lungo tra 14 e 16 mm) il braccio destro del sacco aortico si allunga a formare l'arteria innominata.

Alla fine, il sesto arco aortico destro, che compare quando l'embrione è lungo 6 mm (circa al giorno 30), diviene l'arteria polmonare destra, mentre il sesto arco aortico sinistro persiste come arteria polmonare sinistra e, durante la vita endouterina, come dotto arterioso.

8.1.3 Arterie coronariche

Le arterie coronarie nascono come ispessimenti dell'endotelio aortico quando l'embrione raggiunge una lunghezza di 10-12 mm (tra il giorno 35 e il giorno 42). Entrambe le arterie coronariche passano ai lati del tronco arterioso e l'arteria coronaria discendente anteriore comincia a svilupparsi. Entrambe le arterie circonflesse si sviluppano quando l'embrione raggiunge i 14 mm (giorno 42) e quando l'embrione è di 20 mm (giorno 43-49) tutti i rami maggiori si sono formati.

8.1.4 Vene polmonari

Le vene polmonari destre e sinistre originano dal plesso capillare degli abbozzi polmonari

formando un plesso venoso polmonare “precoce” che comunica con le vene cardinali e ombelico-vitelline. Parallelamente dal plesso splancnico (gemmazione del tubo cardiaco) origina una vena polmonare principale (quando l’embrione ha una lunghezza di 5 mm, giorno 29), in cui confluiranno le vene polmonari destre e sinistre e, a contatto con la superficie posteriore dell’atrio sinistro, darà poi vita a quattro vene polmonari separate [1].

8.2 Circolazione fetale

L’apparato cardiocircolatorio dell’embrione raggiunge uno sviluppo anatomico fondamentalmente definitivo alla 10^a settimana di età gestazionale. Nella circolazione fetale la vena ombelicale porta il sangue arterioso dalla placenta al feto. Questo sangue è diventato arterioso attraversando i villi coriali, dove assume ossigeno dal sangue materno ed elimina l’anidride carbonica. La vena ombelicale penetra, attraverso l’ombelico, nel corpo fetale. Attraverso la vena cava inferiore, il sangue affluisce nell’atrio destro del cuore. L’atrio destro fetale, in corrispondenza dello sbocco della vena cava inferiore, presenta una formazione chiamata valvola di Eustachio, per mezzo della quale la corrente sanguigna proveniente dalla vena cava inferiore viene avviata verso il setto interatriale, nel quale è presente il foro ovale o di Botallo che mette in comunicazione i due atri. Di conseguenza, il sangue proveniente dalla vena cava inferiore passa direttamente dall’atrio destro all’atrio sinistro, dove affluisce anche il sangue che proviene dai polmoni mediante le quattro vene polmonari, convogliato poi tutto nel ventricolo sinistro e da qui nell’aorta e a tutto il corpo. Dal ventricolo destro, attraverso l’arteria polmonare, una piccola quantità di sangue arriva ai polmoni, che risultano ancora collabiti e sostanzialmente privi di funzione respiratoria, e che pertanto offrono una notevole resistenza al flusso del sangue. La maggior parte del sangue viene quindi deviata verso il dotto arterioso di Botallo che sbocca nell’aorta dove,

unendosi al sangue proveniente dal ventricolo sinistro, viene convogliato nelle arterie iliache interne e quindi nelle arterie ombelicali; da qui percorrerà il funicolo ombelicale e le arterie omonime e si distribuirà nei villi coriali per essere re-ossigenato e per eliminare l’anidride carbonica. Nell’organismo fetale nessun apparato è perfuso dal sangue esclusivamente arterioso, in quanto il sangue arterioso proveniente dalla placenta per mezzo della vena ombelicale si mescola nella vena cava inferiore, nell’atrio destro e sinistro e nell’aorta a valle dello sbocco del dotto di Botallo. Nella circolazione fetale si hanno distretti ad alto flusso e a bassa resistenza (placenta) e distretti a basso flusso e a elevata resistenza (polmone e fegato), in relazione alla presenza di punti di scambio tra sangue venoso e arterioso che mantengono il flusso del sangue nei polmoni fetali mai oltre l’8-10% della gittata totale. Dal punto di vista anatomico, esistono strutture che permettono di bypassare i distretti ad alta resistenza e a basso flusso, in particolare il dotto venoso di Aranzio, il forame ovale e il dotto di Botallo (che, creando una comunicazione tra arteria polmonare e aorta, esclude la circolazione polmonare), che andranno incontro a chiusura subito dopo il parto. Il sangue fetale proveniente dalla placenta normalmente si distribuisce per l’80% al fegato e per il 20% passa nel dotto venoso di Aranzio. Il feto a 6-7 settimane ha una frequenza cardiaca di circa 160-170 battiti per minuto (bpm), mentre alla nascita di 130-140 bpm [2-4].

8.3 Principali sequenze in risonanza magnetica

Nello studio cardio-vascolare del feto si utilizzano come sequenze di centramento e anatomiche le sequenze SSH T2 pesate a strato sottile nei tre piani dello spazio e si acquisiscono inoltre [5-9]:

- sequenze SSH T2 pesate a strato sottile (3-4 mm) con orientamento multiplanare assiale, sagittale e coronale ortogonale

all'organo/distretto di interesse per la valutazione di dettaglio dell'anatomia fetale;

- sequenze *GRadient Echo* (GRE) con tecnica *Steady State Free Precession* (SSFP) nei tre piani dello spazio, per la valutazione del distretto cardiaco e dei grossi vasi e secondo le principali scansioni utilizzate nell'ecocardiografia fetale [10, 11]. Tali sequenze infatti presentano un contrasto intermedio T1 e T2, utilizzano un (Tempo di Ripetizione) TR ultrabreve (<3 ms) non risultando influenzate dal movimento e permettono di evidenziare come strutture a elevata intensità di segnale i fluidi in movimento;
- sequenze cine-RM di tipo SSFP con tecnica di campionamento del k-spazio sia radiale che cartesiana (2DFT) orientate secondo le principali scansioni utilizzate nell'ecocardiografia fetale. Tali sequenze consentono di individuare il cuore e i grossi vasi, ottenendo la visualizzazione dell'asse cardiaco, la valutazione del regolare *situs* viscerocardiaco, l'identificazione delle camere cardiache e della simultanea contrazione atriale e ventricolare. La combinazione della tecnica SSFP con quella *real time* ha consentito la visualizzazione del movimento cardiaco senza la necessità di ricorrere al *triggering*, ovvero alla sincronizzazione con il cuore fetale, nè all'apnea respiratoria della madre. L'impossibilità di effettuare un *triggering* cardiaco sul cuore fetale non ne consente lo studio funzionale; tuttavia un primo approccio in tal senso è stato sperimentato da Yamamura in due diversi studi su feti di pecora, applicando dapprima una tecnica invasiva [12] e poi paragonando la stessa con l'autosincronizzazione [13]. Quest'ultimo promettente metodo necessita però di ulteriori validazioni prima di poter essere applicato su cuori fetali umani.

Abitualmente uno studio di RM fetale richiede dai 20 ai 45 minuti, con un minimo di 15 minuti [14].

8.4 Anatomia RM cardio-vascolare normale e piani di scansione

Lo studio del cuore fetale con tecnica RM è ora possibile grazie all'impiego combinato di sequenze morfologiche e dinamiche con scansioni multiplanari, potendo utilizzare in particolare due differenti tecniche di acquisizione dei piani anatomici.

La tecnica d'esame si basa sull'acquisizione di scansioni ortogonali ai tre assi corporei (assiale, coronale e sagittale) e di multipli pacchetti assiali, sagittali e obliqui, riproducendo le principali scansioni ecocardiografiche, in particolare (Tabella 8.1) [15, 16]:

- scansioni trasversali (scansioni quattro camere, origine dell'aorta [cinque camere], tratto di efflusso della polmonare [tre vasi], arco aortico);
- scansioni sagittali (scansioni asse corto del ventricolo sinistro, tricuspide-aorta, asse lungo del dotto arterioso di Botallo, asse lungo dell'arco aortico);
- scansioni oblique (scansioni asse lungo del ventricolo sinistro, arco aortico e dotto arterioso in visualizzazione simultanea).

Con queste scansioni possiamo determinare la posizione e le dimensioni del cuore, l'orientamento dell'asse cardiaco, la valutazione di sede, posizione e dimensioni delle camere cardiache, i principali vasi di afflusso (Vena Cava Superiore - VCS, Vena Cava Inferiore - VCI e le vene polmonari - VP) e di efflusso (Aorta - Ao e Arteria Polmonare - AP), la concordanza tra ventricoli e vasi di efflusso, il decorso e il calibro dell'arco aortico.

Lo studio anatomico del cuore prevede la valutazione sistematica dell'orientamento cardiaco, della volumetria cardiaca, della morfologia e volumetria delle camere cardiache e della struttura delle pareti miocardiche, nonché lo studio dell'integrità del setto interventricolare (SIV) e di quello interatriale (SIA) con il forame ovale (FO).

Nello studio anatomico dei grossi vasi, invece, si procede con la valutazione dell'origine, del calibro e del decorso dei vasi di

Tabella 8.1 Principali scansioni RM/ecografiche

Scansioni RM/Ecocardiografia		Strutture anatomiche visualizzate
<i>Trasversali</i>	4 camere	Dimensione del cuore rispetto al torace Posizione dell'apice cardiaco Inclinazione dell'asse cardiaco Struttura delle camere cardiache Piano valvolare AV Setto interventricolare e interatriale
	5 camere	4 camere + posizione e rapporto con cuore dell'aorta all'origine
	3 vasi	Vena cava superiore Aorta Arteria polmonare Porzione del dotto arterioso che mette in comunicazione l'AP all'Ao discendente
	Asse lungo dell'arco aortico	Arco Ao e VCS
<i>Sagittali</i>	Asse corto del ventricolo sinistro	Spessore miocardico Tratto di efflusso AP Posizione relativa dei due ventricoli
	Tricuspide - aorta	Posizione delle camere cardiache di destra Tratto di afflusso della VCI e della VCS Tratto d'efflusso dell'aorta
	Asse lungo del dotto arterioso	AP che si connette all'Ao tramite il dotto arterioso che si porta successivamente verso l'aorta discendente
	Asse lungo dell'arco aortico	Arco aortico in asse lungo con l'origine dei 3 vasi epiaortici Atrio sinistro
<i>Oblique</i>	Asse lungo del ventricolo sinistro	Tratto di efflusso e l'aorta all'origine e nel suo tratto ascendente
	Arco e del dotto Arterioso	Visione simultanea arco Ao e arco DA

efflusso cardiaco (Ao, AP) e del dotto arterioso (DA) e la valutazione del calibro e decorso dei vasi di afflusso (VCS, VCI, VP) [17, 18].

8.4.1 Scansioni trasversali

8.4.1.1 Quattro camere

In questa scansione è possibile analizzare (Fig. 8.1):

- dimensione del cuore rispetto al torace;
- posizione dell'apice cardiaco;
- inclinazione dell'asse cardiaco;
- struttura delle camere cardiache;
- piano valvolare atrio ventricolare (PAV);
- setto interventricolare e interatriale.

Il piano quattro camere valuta in prima istanza le dimensioni delle camere atriali e ventricolari, l'orientamento dell'apice, l'o-

rientamento dell'asse cardiaco (44° circa) e lo spessore miocardico. Attualmente non risulta valutabile la differenza di spessore in relazione allo stato di sistole e diastole. Il miocardio presenta un caratteristico segnale ipointenso; in particolare, la parete miocardica risulta più spessa, uniforme e ipointensa in corrispondenza del ventricolo sinistro, mentre è più sottile, frastagliata, trabecolata in corrispondenza del ventricolo destro. In RM risulta più difficile documentare la fascia moderatrice all'apice del ventricolo destro. Il setto interventricolare è ben visualizzabile con spessore e intensità di segnale analoga a quella delle pareti ventricolari. I due ventricoli risultano sostanzialmente simmetrici, di morfologia triangolare con aspetto più allungato il ventricolo sinistro e lievemente più allargato il destro. I muscoli papillari possono essere documentati soprat-

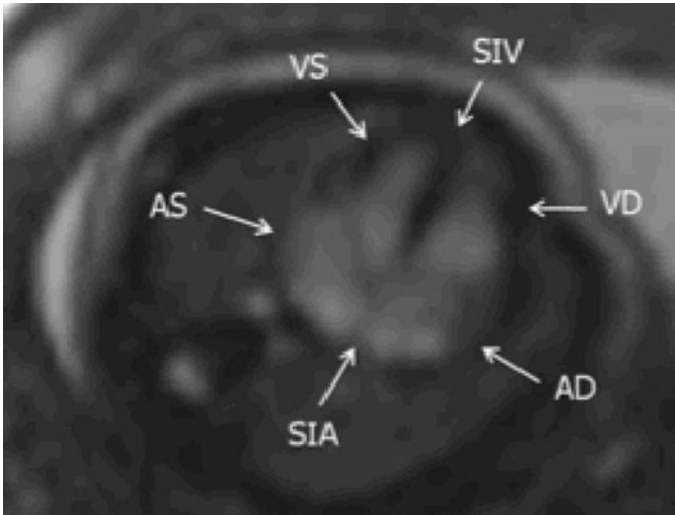


Fig. 8.1 In questa scansione si analizzano la dimensione del cuore rispetto al torace, la posizione dell'apice cardiaco, l'inclinazione dell'asse cardiaco, la struttura delle camere cardiache, il piano valvolare atrio ventricolare (PAV) e i setti interventricolare e interatriale. VD, ventricolo destro; AD, atrio destro; VS, ventricolo sinistro; AS, atrio sinistro; SIV, setto interventricolare; SIA, setto interatriale

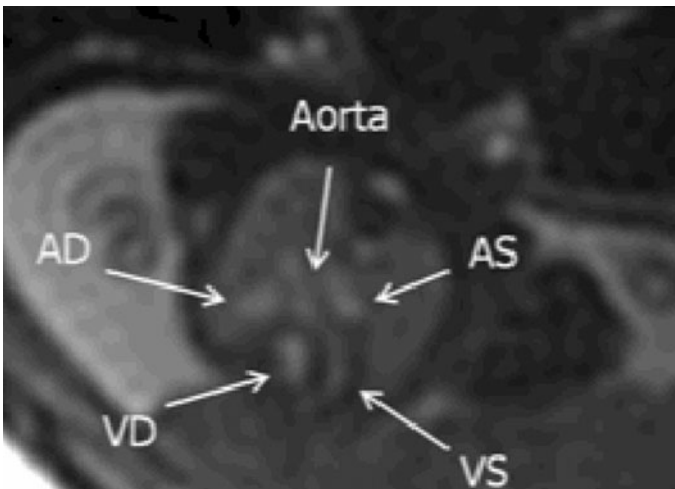


Fig. 8.2 Oltre alle strutture menzionate nella scansione 4 camere, si osserva l'emergenza dell'aorta dal ventricolo sinistro, posta al centro del cuore. VD, ventricolo destro; AD, atrio destro; VS, ventricolo sinistro; AS, atrio sinistro

tutto quando ipertrofici in relazione a una condizione di ipertrofia miocardica. Le valvole atrioventricolari non sono visualizzabili se non indirettamente e come una sottile linea ipointensa che viene definita piano atrioventricolare. Gli atri presentano uno spessore miometriale sottile, risultano simmetrici e il setto interatriale è rappresentato da una linea sottile ipointensa, mal definibile nel II trimestre di gravidanza, che risulta progressivamente meglio identificabile in epoche gestazionali successive [19-21].

8.4.1.2 Origine aortica (cinque camere)

In questa scansione è possibile analizzare, oltre alle strutture menzionate nella scansione precedente, l'emergenza dell'aorta dal ventricolo sinistro, posta al centro del cuore (Fig. 8.2).

8.4.1.3 Tratto di efflusso polmonare (tre vasi)

Permette di valutare da destra verso sinistra la vena cava superiore, l'aorta e l'arteria polmonare e la porzione del dotto arterioso, che mette in comunicazione l'AP all'Ao discendente (Fig. 8.3).

8.4.1.4 Asse lungo dell'arco aortico

Questa scansione mostra sia l'arco dell'aorta che la vena cava superiore (Fig. 8.4).

8.4.2 Scansioni sagittali

8.4.2.1 Scansione asse corto del ventricolo sinistro

Consente una buona valutazione dello spessore miocardico, del tratto di efflusso dell'arte-

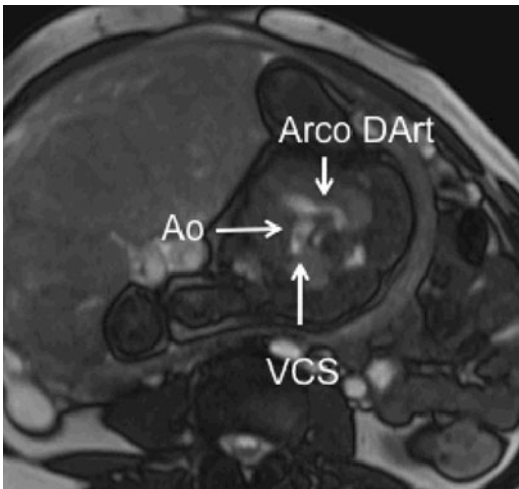


Fig. 8.3 L'immagine permette di valutare da destra verso sinistra la vena cava superiore (VCS), l'aorta (Ao) e l'arteria polmonare e la porzione del dotto arterioso (Arco DArt) che mette in comunicazione l'AP all'Ao discendente

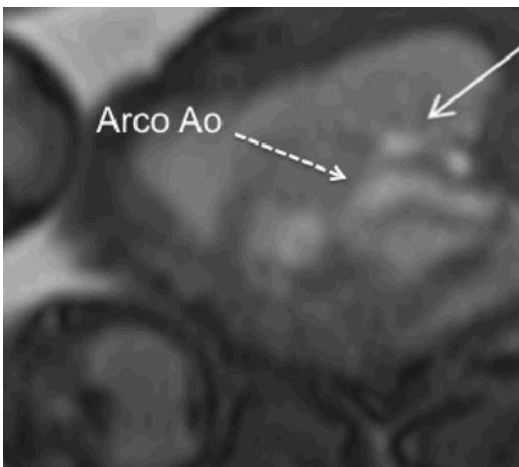


Fig. 8.4 Si documenta in questo piano l'arco aortico in asse lungo sul piano assiale (freccia tratteggiata, Arco Ao) e a destra dello stesso la VCS (freccia bianca)

ria polmonare e della posizione relativa dei due ventricoli (Fig. 8.5).

8.4.2.2 Scansione tricuspide-aorta

Posizione delle camere cardiache di destra.

Tratto di afflusso della VCI e della VCS.

Tratto d'efflusso dell'aorta (Fig. 8.6).

8.4.2.3 Scansione asse lungo del dotto arterioso

Permette di visualizzare l'AP che si connette all'Ao tramite il dotto arterioso, il quale forma un arco che si porta successivamente verso l'aorta discendente (Fig. 8.7).

8.4.2.4 Scansione asse lungo dell'arco aortico

Arco aortico in asse lungo, in cui è possibile in alcuni casi osservare anche l'origine dei vasi epiaortici.

Atrio sinistro (Fig. 8.8).

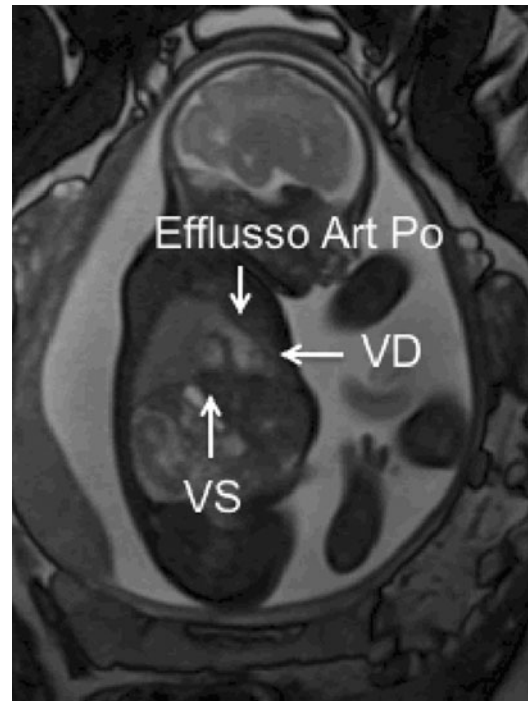


Fig. 8.5 L'immagine consente la valutazione dello spessore miocardico, del tratto di efflusso dell'arteria polmonare (Efflusso Art Po) e della posizione relativa dei due ventricoli (VD, ventricolo destro; VS, ventricolo sinistro)

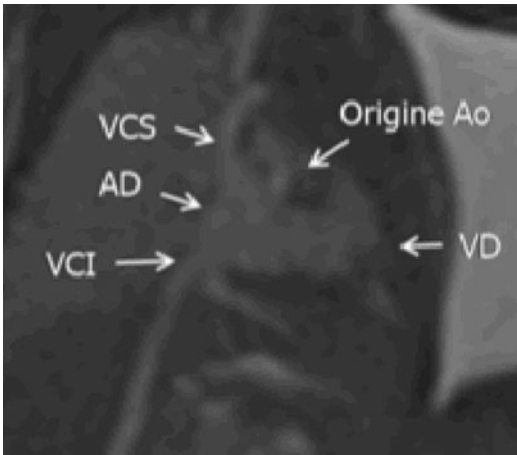


Fig. 8.6 L'immagine permette di documentare sullo stesso piano le strutture destre del cuore (*AD*, atrio destro; *VD*, ventricolo destro) con l'afflusso atriale delle vene cave (*VCS*, vena cava superiore; *VCI*, vena cava inferiore). Al centro del cuore l'origine dell'Aorta (*Origine Ao*)

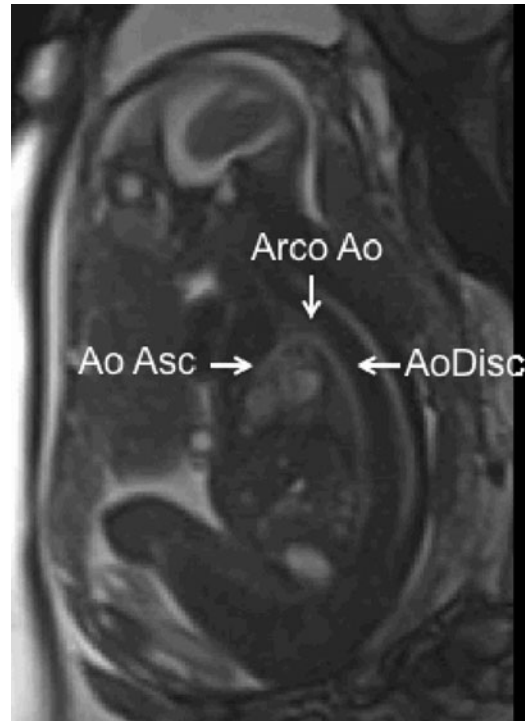


Fig. 8.8 Aorta toracica nelle sue porzioni dall'ascendente (*Ao Asc*), passando per l'arco (*Arco Ao*) fino all'aorta discendente (*Ao Disc*) sul piano sagittale

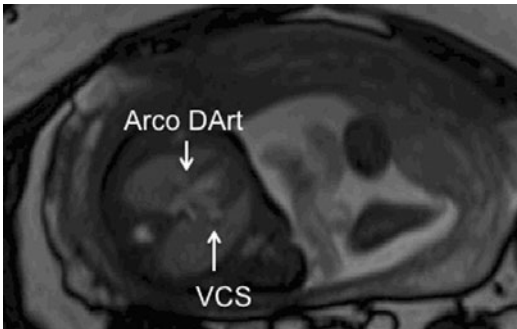


Fig. 8.7 Arco del dotto arterioso (*Arco DArt*) in asse lungo (*VCS*, vena cava superiore)

8.4.3 Scansioni oblique

8.4.3.1 Scansione asse lungo del ventricolo sinistro

Questa scansione visualizza il tratto di efflusso e l'aorta all'origine e nel suo tratto ascendente (Fig. 8.9).

8.4.3.2 Scansione dell'arco e del dotto arterioso

Consente di visualizzare simultaneamente l'arco e il dotto arterioso e di mettere a con-

fronto calibro e decorso dei 2 vasi (Fig 8.10).

Non sono ancora a disposizione dati ausologici in merito alla valutazione delle strutture cardiache, essendo di recente acquisizione lo studio con RM del cuore fetale. Dai primi riscontri esiste tuttavia una sovrapposizione dei dati con la biometria ecocardiografica [22-25].

Bibliografia

1. Carlson B (ed) (2008) Human embryology and developmental biology. Elsevier-Mosby, Amsterdam
2. Runge MS, Ohman EM (eds) (2009) Cardiologia di Netter, Emsi, Roma
3. Cook AC, Yates RW, Anderson RH (2004) Normal and abnormal fetal cardiac anatomy. *Prenat Diagn* 24:1032-1048
4. Gardiner H, Brodzski J, Eriksson A et al (2001) Ventriculo-vascular interaction in the normal development of the fetal circulation. *Early Hum Dev* 65:97-106

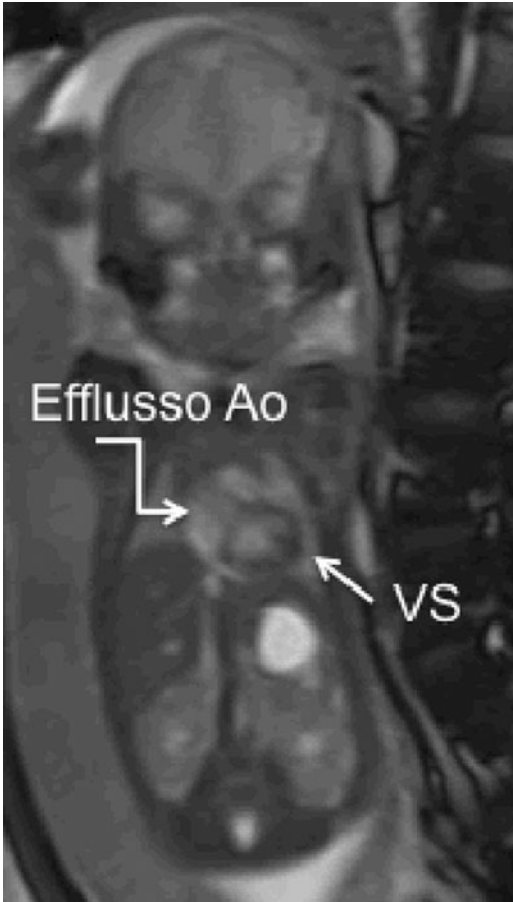


Fig. 8.9 L'immagine permette di visualizzare il tratto di efflusso aortico (*Efflusso Ao*) e l'aorta all'origine in corrispondenza del ventricolo sinistro (*VS*) e nel suo tratto ascendente

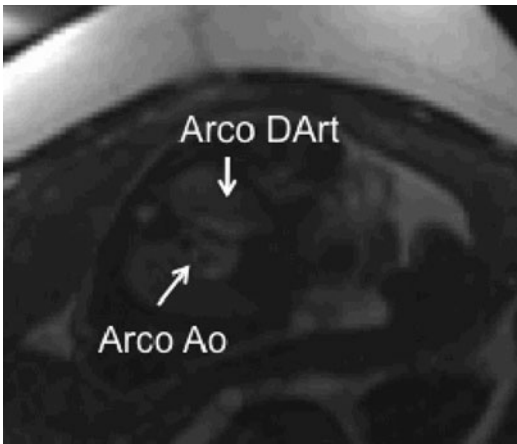


Fig. 8.10 Si osservano sullo stesso piano e simultaneamente l'arco (*Arco Ao*) e il dotto arterioso (*Arco DArt*) consentendo di confrontare calibro e decorso dei due vasi

5. Shankaranarayanan A, Simonetti OP, Laub G et al (2001) Segmented k-space and real-time cardiac cine mr imaging with radial trajectories. *Radiology* 221:827-836
6. Deng J, Rodeck CH (2004) New fetal cardiac imaging techniques. *Prenat Diagn* 24:1092-1103
7. Yang PC, Kerr AB, Liu AC et al (1998) New real-time interactive cardiac magnetic resonance imaging system complements echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 32:2049-2056
8. Chung T (2000) Assessment of cardiovascular anatomy in patients with congenital heart disease by magnetic resonance imaging. *Pediatr Cardiol* 21:18-26
9. Muthupillai R, Cheong B, Pereyra M, Flamm SD (2006) Fast 3D cine steady-state free precession imaging with sensitivity encoding for assessment of left ventricular function in a single breath-hold. *AJR Am J Roentgenol* 187:1235-1239
10. Fuchs F, Laub G, Othomo K (2003) TrueFISP - technical considerations and cardiovascular applications. *Eur J Radiol* 46:28-32
11. Moon JC, Lorenz CH, Francis JM et al (2002) Breath-hold FLASH and FISP cardiovascular MR imaging: left ventricular volume differences and reproducibility. *Radiology* 223:789-797
12. Yamamura J, Schnackenburg B, Kooijmann H et al (2009) High resolution MR imaging of the fetal heart with cardiac triggering: a feasibility study in the sheep fetus. *Eur Radiol* 19:2383-2390
13. Yamamura J, Frisch M, Ecker H et al (2011) Self-gating MR imaging of the fetal heart: comparison with real cardiac triggering. *Eur Radiol* 21:142-149
14. Kunz RP, Oellig F, Krummenauer F et al (2005) Assessment of left ventricular function by breath-hold cine MR imaging: comparison of different steady-state free precession sequences. *J Magn Reson Imaging* 21:140-148
15. Allan L (2004) Technique of fetal echocardiography. *Pediatr Cardiol* 25: 223-233
16. Cooper MJ, Enderlein MA, Dyson DC et al (1995) Fetal echocardiography: retrospective review of clinical experience and an evaluation of indications. *Obstet Gynecol* 86:577-582
18. Carvalho JS (2005) Fetal echocardiography. A sophisticated tool in obstetrics. *Minerva Cardioangiol* 53:129-138
18. Jeanty P, Chaoui R, Tihonenko I, Grochal F (2007) A review of findings in fetal cardiac section drawings, part 1: the 4-chamber view. *J Ultrasound Med* 26:1601-1610
19. Jeanty P, Chaoui R, Grochal F, Tihonenko I (2007) A review of findings in fetal cardiac section drawings, part 2: high abdominal views. *J Ultrasound Med* 26:1743-1746
20. Simpson J (2004) Echocardiographic evaluation of cardiac function in the fetus. *Prenat Diagn* 24:1081-1091
21. Gottliebson WM, Border WL, Franklin CM et al (2006) Accuracy of fetal echocardiography: a cardiac segment-specific analysis. *Ultrasound Obstet Gy-*

- necol 28:15-21
22. Tanner K, Sabine N, Wren C (2005) Cardiovascular malformations among preterm infants. *Pediatrics* 116:e833-e838
 23. Manganaro L, Savelli S, Di Maurizio M et al (2009) Assessment of congenital heart disease (CHD): is there a role for fetal magnetic resonance imaging (MRI)? *Eur J Radiol* 72:172-180
 24. Meyer-Wittkopf M, Cook A, McLennan A et al (1996) Evaluation of three-dimensional ultrasonography and magnetic resonance imaging in assessment of congenital heart anomalies in fetal cardiac specimens. *Ultrasound Obstet Gynecol* 8:303-308
 25. Earing MG, Webb GD (2005) Congenital heart disease and pregnancy: maternal and fetal risks. *Clin Perinatol* 32:913-919