

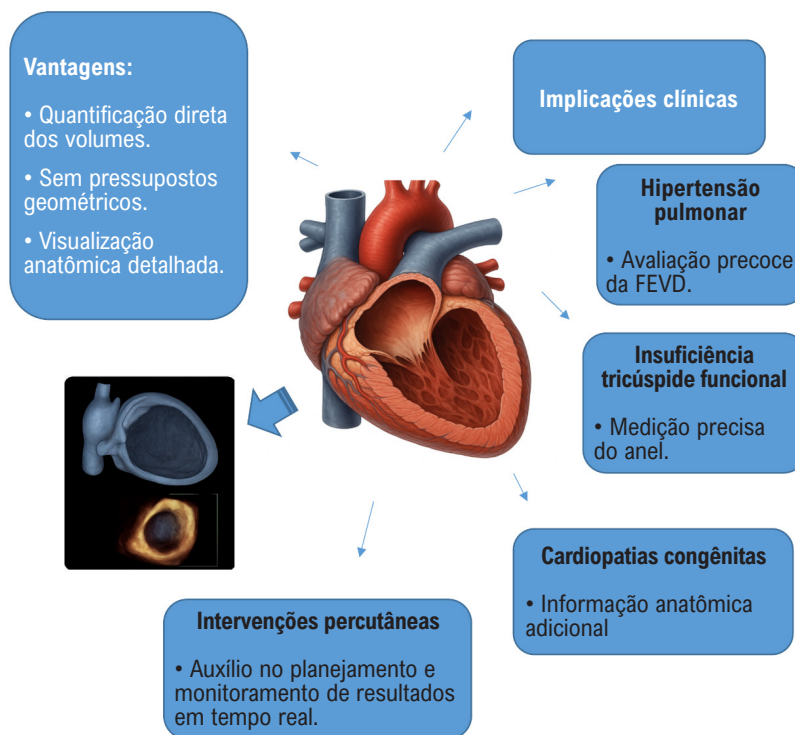
Avaliação Ecocardiográfica Tridimensional do Ventrículo Direito: Porque Devemos Utilizá-la

Three-Dimensional Echocardiographic Assessment of the Right Ventricle: Why Should We Use It

Tiago R. Politi,^{1,2} Rodrigo B.M. Barretto,¹ João Cesar Nunes Sbrano,^{1,2} David Costa de Souza Le Bihan,^{1,2} Wilson Mathias Jr.^{1,2}

Universidade de São Paulo, Instituto do Coração,¹ São Paulo, SP – Brasil
Grupo Fleury,² São Paulo, SP – Brasil

Figura Central: Avaliação Ecocardiográfica Tridimensional do Ventrículo Direito: Porque Devemos Utilizá-la



Arq Bras Cardiol: Imagem cardiovasc. 2026; 39(1):e20250096

Vantagens e implicações clínicas da ecocardiografia tridimensional na avaliação do ventrículo direito. FEVD: fração de ejeção do ventrículo direito.

Palavras-chave

Ecocardiografia Tridimensional; Ventrículo Direito; Função Ventricular Direita; Ressonância Magnética Cardíaca

Correspondência: Tiago Politi •

INCOR HC-FMUSP Serviço de Ecocardiografia- Universidade de São Paulo.
Avenida Dr. Eneas de Carvalho Aguiar, 44. CEP: 05508-900. São Paulo, SP – Brasil
E-mail: politi.cardiol@gmail.com

Artigo recebido em 20/11/2025; revisado em 27/11/2025; aceito em 28/11/2025.
Editor responsável pela revisão: Marcelo Tavares

DOI: <https://doi.org/10.36660/abcimg.20250096>

Resumo

A análise do Ventrículo Direito (VD) pela ecocardiografia bidimensional (2D) tem historicamente enfrentado desafios devido a complexa e peculiar geometria e orientação torácica desta câmara cardíaca. Neste cenário, a ecocardiografia tridimensional (3D) emergiu como uma ferramenta promissora para superar e descortinar tais limitações, permitindo uma quantificação acurada dos volumes e fração de ejeção, sem depender de suposições geométricas. Logo, a incorporação rotineira da ecocardiografia 3D no estudo do VD poderá

redefinir paradigmas diagnósticos e prognósticos, promovendo uma abordagem mais precisa e personalizada na cardiologia moderna. E para sedimentar e destacar esta ferramenta, este artigo de revisão, que aborda os fundamentos técnicos da ecocardiografia 3D no estudo do VD, discute as vantagens sobre a ecocardiografia bidimensional convencional, sua validação frente a ressonância magnética cardíaca (RMC) e revisa aplicações clínicas relevantes, incluindo hipertensão pulmonar, insuficiência tricúspide funcional, cardiopatias congênicas e insuficiência cardíaca direita. Além disso, são apresentadas as limitações atuais da técnica, perspectivas futuras e recomendações práticas baseadas na literatura atual.

Introdução

O formato do Ventrículo Direito (VD) é complexo e, portanto, qualquer imagem que se obtenha pelo método bidimensional (2D) não consegue representá-lo de forma fidedigna. Na vista ecocardiográfica 2D apical, o VD parece triangular, enquanto na vista transversal e em condições normais, apresenta-se com formato em crescente. Sua arquitetura é composta por três componentes principais: via de entrada, que consiste na valva tricúspide (VT), cordas tendíneas e músculo papilar; miocárdio apical trabecular e infundíbulo ou cone, que se refere à região lisa da via de saída do miocárdio ventricular. Este último representando 25% a 30% de seu volume.^{1,2}

As três partes do VD não estão no mesmo plano, como visto em um ecocardiograma 3D de um indivíduo normal (Figura 1). O trato de entrada se contrai mais cedo do que o infundíbulo, e a resposta desses três segmentos a medicamentos, estimulação simpática, sobrecarga de volume e pressão pode ser diferente. Por exemplo, estudos em animais e humanos sugeriram que a resposta inotrópica do infundíbulo pode ser maior do que a do trato de entrada.³

Além disso, as miofibrilas apresentam organização circunferencial no tecido subepicárdico e longitudinal no subendocárdico, sendo que a contração ocorre principalmente em sentido longitudinal. Isso explica em parte o porquê a análise da deformação longitudinal tem mostrado maior valor prognóstico e porque muitos estudos sobre a deformação e a taxa de deformação do VD se concentraram nas deformações longitudinais, e não nas radiais ou circunferenciais. Além disso, a deformação longitudinal da parede livre do VD apresentou correlação mais forte com a fração de ejeção do ventrículo direito (FEVD), determinada por ressonância magnética (RM), do que com a alteração da área fracionada do VD (FAC) e a onda S' do anel tricúspide lateral, em um grupo heterogêneo de pacientes.⁴

No cenário clínico, a avaliação acurada do ventrículo direito (VD), quando disponível, é essencial em diversas condições cardiovasculares, incluindo doenças pulmonares, cardiopatias congênicas, insuficiência cardíaca direita e após intervenções valvares. E como descrito anteriormente, devido à anatomia

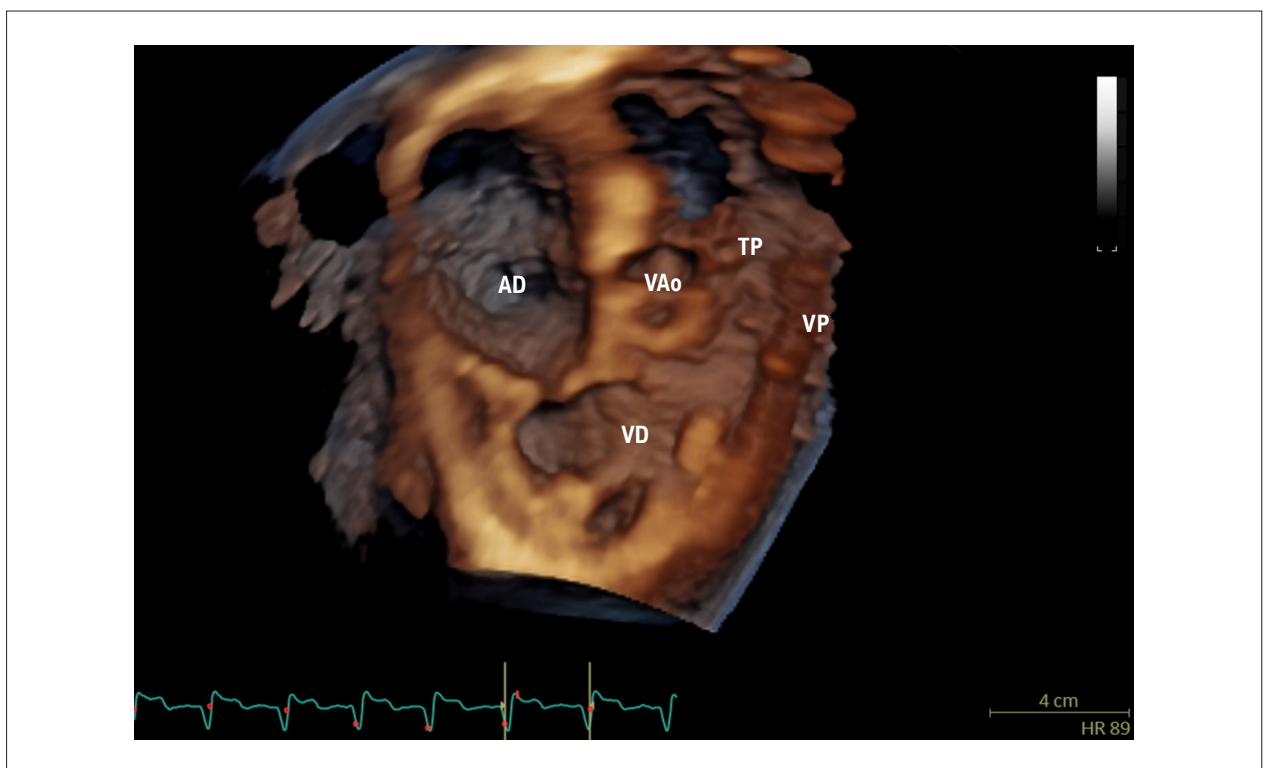


Figura 1 – Imagem 3D exibindo partes do ventrículo direito em planos diferentes. A imagem evidencia a via de entrada, porção trabecular e infundíbulo em corte tridimensional, destacando as estruturas anatômicas. VT: valva tricúspide; VP: valva pulmonar; VD: ventrículo direito; AO: aorta; TP: tronco pulmonar; AD: átrio direito.

assimétrica, forma piramidal e um padrão de contração longitudinal peristáltico, sua análise torna-se dificultada por métodos ecocardiográficos convencionais bidimensionais (2D).^{5,6} Além disso, a variabilidade interobservador e a dependência de planos ortogonais limitam a reprodutibilidade e acurácia da ecocardiografia 2D na quantificação da função do VD.⁷

Logo, a ecocardiografia tridimensional (3D) emerge como ferramenta fundamental no entendimento desta complexa câmara cardíaca, representando um avanço significativo nesse contexto, oferecendo medidas volumétricas diretas e uma melhor caracterização de sua mecânica contrátil. E com o desenvolvimento de *softwares* dedicados e transdutores com maior resolução temporal e espacial, tornou-se possível integrar a avaliação do VD de forma mais robusta e confiável na prática clínica (Figura central).^{1,8}

A seguir apresentamos os princípios técnicos da ecocardiografia 3D na análise do VD, revisamos suas aplicações clínicas mais relevantes e discutimos suas limitações, conforme as recomendações da literatura atual.^{9,10}

Fundamentos Técnicos da Ecocardiografia 3D do Ventrículo Direito

A obtenção adequada da imagem tridimensional do VD requer atenção especial a aspectos técnicos específicos:

- Aquisição de volume total (*full-volume*): idealmente com apneia, em quatro ou seis ciclos cardíacos para maior resolução temporal, usando transdutores *matrix-array*, na janela apical focada do VD ou na janela paraesternal de via de entrada.
- Taxa de frames (*volume rate*): deve-se buscar um equilíbrio entre alta resolução temporal (>20 volumes/s) e cobertura anatômica completa.
- Visualização otimizada da valva tricúspide: é crucial alinhar os planos para incluir anel tricúspide, ápice do VD e toda a cavidade.

Para a visualização tridimensional da valva tricúspide por via transesofágica, deve-se procurar obter imagens com zoom tridimensional no esôfago distal, de forma a deixar a valva com uma orientação mais perpendicular à fonte emissora, otimizando-se a resolução espacial.

Softwares modernos utilizam algoritmos de rastreamento automático (*auto-contouring*) baseados em aprendizado de máquina para quantificação do volume diastólico final (VDF), volume sistólico final (VSF) e FEVD visto na Figura 2.^{3,11,12}

Avaliação dos Volumes e Fração de Ejeção do Ventrículo Direito

A validação clínica da determinação de volumes ventriculares e FEVD por ressonância magnética está bem estabelecida.¹³ Na ecocardiografia tridimensional, os dados experimentais *in vitro* e em estudos clínicos iniciais confirmam boa precisão na quantificação de volume e FEVD.¹ Contudo, os volumes do VD derivados da ecocardiografia 3D apresentaram subestimação consistente em relação à RMC, incluindo uma diferença média de FEVD que pode chegar a -0,9%.¹³ Por isso, alguns autores recomendam o ponto de

corte de normalidade para disfunção sistólica do VD quando FEVD 3D for inferior a 45%.^{14,15}

Ao calcular volumes e FEVE pela ecocardiografia 3D, estudos demonstraram diferenças significativas em relação ao gênero: o volume diastólico final absoluto foi maior em homens (129 ± 25 mL vs. 102 ± 33 mL em mulheres; P < 0,01). No entanto, ao indexar por massa corporal magra (mas não por área de superfície corporal ou altura), essa diferença desapareceu (2,1 ± 0,5 vs. 2,2 ± 0,4 mL/kg; p = NS)(8). A faixa de valores normais para homens é de 87 mL/m² para o VDF; 44 mL/m² para o VSF e para mulheres 74 mL/m² para o VDF; 36 mL/m² para o VSF.¹⁵

Vantagens da Ecocardiografia 3D em relação a 2D na Avaliação do Ventrículo Direito

Devido a geometria complexa do VD, a acurácia da ecocardiografia 2D é limitada para medidas de volumes, levando a subestimação dos volumes e dependência significativa da orientação dos planos de corte.⁵ Por outro lado, a ecocardiografia 3D permite aquisição volumétrica completa do VD, reconstrução anatômica real e quantificação sem pressupostos geométricos, com excelente correlação com RMC (r ≈ 0,80–0,92) e menor viés sistemático em comparação à 2D.¹⁶

Do ponto de vista clínico, a superioridade da ecocardiografia 3D em relação à ecocardiografia 2D é mais evidente em situações de remodelamento acentuado do VD (por exemplo: hipertensão pulmonar, insuficiência tricúspide funcional grave e cardiopatias congênitas), nas quais a distorção anatômica torna o modelo geométrico da ecocardiografia 2D ainda menos representativo (Tabela 1).^{17,18} No entanto, a ecocardiografia 3D ainda exige maior qualidade de janela acústica e pode ser limitada por arritmias e baixa taxa de frames, especialmente em pacientes instáveis.¹⁴

Ecocardiografia 3D vs. RMC do VD: acurácia, aplicabilidade clínica e papel da IA

Como já citado, a ressonância magnética cardíaca (RMC) é amplamente reconhecida como referência na quantificação dos volumes e da FEVD devido à sua alta reprodutibilidade e independência da janela acústica.¹³ No entanto, a ecocardiografia 3D emergiu como uma alternativa promissora, especialmente em contextos em que a RMC não está disponível, é contraindicada ou inviável.

Apesar da superioridade da RMC em termos de acurácia absoluta, a ecocardiografia 3D oferece vantagens práticas que a tornam ideal para uso à beira-leito, em pacientes críticos e em avaliações seriadas. Em condições como insuficiência cardíaca direita, hipertensão pulmonar ou durante o seguimento de terapias valvares, a ecocardiografia 3D permite rápida obtenção de parâmetros prognósticos, como volumes e FEVD, e área do anel tricúspide em tempo real.^{19,20}

Além disso, *softwares* com inteligência artificial vêm aprimorando a acurácia da ecocardiografia 3D ao reduzir a variabilidade interobservador, encurtar o tempo de pós-processamento e melhorar a consistência das medidas, aproximando seus resultados ainda mais dos da RMC¹⁹ (Tabela 2).

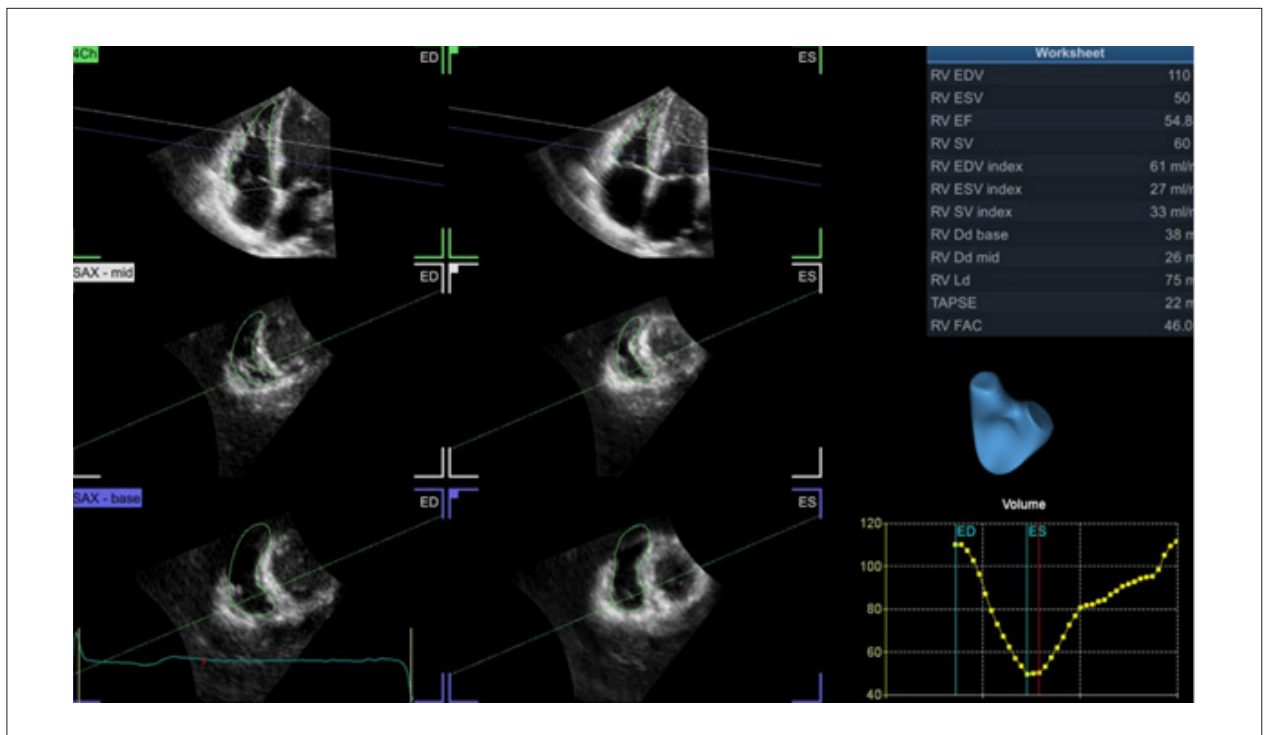


Figura 2 – Aquisição e reconstrução tridimensional do ventrículo direito em tempo real. O painel superior mostra o volume total obtido a partir da janela apical. O painel inferior apresenta a reconstrução multiplanar ortogonal, com delimitação automática da borda endocárdica para cálculo de volume e fração de ejeção.

Tabela 1 – Comparação entre Ecocardiografia 2D e 3D na Avaliação do Ventrículo Direito

Característica	Ecocardiografia 2D	Ecocardiografia 3D
Geometria assumida	Sim (formato de elipsoide ou pirâmide)	Não (volume real capturado)
Dependência de planos anatômicos	Alta	Baixa
Reprodutibilidade	Moderada	Alta
Tempo de aquisição	Curto	Requer vários ciclos cardíacos
Avaliação do anel tricúspide	Uniplanar	Multiplanar e volumétrica
Uso em hipertensão pulmonar	Limitado	Alta acurácia prognóstica
Tempo de pós processamento	Rápido	Moderado a longo (depende da estação de trabalho)
Acurácia no cálculo da FEVD	Baixa-moderada	Alta (boa correlação com a RMC)
Limitações	Dependência de ângulo e janela acústica	Artefatos e menor resolução temporal

Fonte: Adaptado de Shiotal.³ FEVD (fração de ejeção do ventrículo direito); RMC (ressonância magnética cardíaca).

Comparação prognóstica da função sistólica do VD: análise da FEVD pela ecocardiografia 3D, strain longitudinal da parede livre do VD pela ecocardiografia 2D e RMC

A determinação de prognóstico a partir da avaliação da função sistólica do VD tradicionalmente utilizava parâmetros convencionais, derivados da ecocardiografia 2D, como

excursão do anel tricúspide (TAPSE) e variação da área (FAC). No entanto, técnicas modernas como ecocardiografia 3D, strain longitudinal da parede livre pela técnica de speckle tracking bidimensional (2D VDSLPL) e ressonância magnética cardíaca (RMC) demonstram maior precisão e poder prognóstico.

Tabela 2 – Comparação entre ecocardiografia 3D e RMC na avaliação do ventrículo direito

Característica	Ecocardiografia 3D	Ressonância Magnética Cardíaca (RMC)
Método de aquisição volumétrica	Tempo real (volumetria direta 3D)	Contorno manual de múltiplos planos
Geometria assumida	Não	Não
Reprodutibilidade	Moderada a alta	Muito alta
Correlação FEVD com RMC	$r = 0,80-0,92$	Padrão de referência
Subestimação de volumes	Sim, leve (dependente da janela)	Não
Avaliação de realce tardio (fibrose)	Não	Sim
Avaliação funcional valvar	Sim (tridimensional)	Sim (com menor resolução temporal)
Resolução temporal	Moderada (>20 volumes/s)	Moderada (30–50 ms por frame)
Resolução espacial	Moderada	Alta
Custo e disponibilidade	Baixo, amplamente disponível	Alto, disponibilidade limitada
Contraindicações	Nenhuma relevante	Implantes metálicos, claustrofobia, DRC dialítica
Tempo de exame	Rápido (5–10 min)	Prolongado (30–60 min)
Aplicabilidade em UTI/à beira-leito	Sim	Não

Fonte: Adaptado de Shiota,³ Lang et al.¹⁴ Maffessanti et al.⁸ FEVD: fração de ejeção do ventrículo direito; RMC: ressonância magnética cardíaca; DRC: doença renal crônica.

A. Validação e prognóstico: FE 3D vs. 2D STLPL VD vs. RMC

- Em pacientes com cardiomiopatia dilatada, a FE 3D mostrou forte associação com eventos adversos cardíacos, superando a relevância prognóstica do 2D VDSLPL em análise multivariada; a FE 3D permaneceu o único preditor independente após ajuste por variáveis clínicas e ecocardiográficas (cut-off 43,4 %, AUC = 0,76).^{21,22}
- Outras evidências apontam que o FE 3D pode oferecer valor prognóstico adicional e incremental sobre o strain 2D e outros parâmetros convencionais, incluindo em populações como pacientes com COVID-19 grave.²¹
- Em Insuficiência Cardíaca com Fração de Ejeção preservada (ICFEP), o strain longitudinal da parede livre do VD, pela técnica de speckle tracking 3D, mostrou valor prognóstico equivalente a fração de ejeção pelo 3D e superior ao 2D STLPL VD (HR 5,73 vs. 3,17 e 3,47).²¹

B. RMC e correlação prognóstica

Embora a RMC permaneça o padrão de referência para quantificação volumétrica do VD, estudos comparativos mostram que a FE 3D se correlaciona bem com a fração de ejeção medida pela RMC, com excelente reprodutibilidade, podendo ser utilizada como alternativa para determinação prognóstica em muitos contextos clínicos^{23,24} (Tabela 3).

Aplicações Clínicas Relevantes da Ecocardiografia 3D do Ventrículo Direito

A seguir, descrevem-se as principais aplicações clínicas da ecocardiografia 3D do VD (Tabelas 4 e 5).

A. Hipertensão Pulmonar

Na Hipertensão Pulmonar (HP), a função do VD é o principal determinante prognóstico. A ecocardiografia 3D permite quantificar com maior precisão a fração de ejeção do Ventrículo Direito (FEVD). Uma FEVD < 45% por 3D se associa a maior risco de descompensação e mortalidade.^{17,25,19}

B. Insuficiência Tricúspide Funcional

A ecocardiografia 3D permite avaliar o mecanismo exato da Insuficiência Tricúspide (IT), incluindo dilatação e geometria do anel tricúspide e músculos papilares (Figura 3 e 4). A reconstrução 3D possibilita mensurar a área do orifício regurgitante efetivo (EROA) com mais acurácia do que o método PISA 2D. Dados importantes para o planejamento de intervenções percutâneas, tais como a separação entre as cúspides, a altura do *tenting* valvar e a interferência de eletrodos na função valvar também podem ser determinados de forma mais acurada por meio das reconstruções tridimensionais.¹⁹

C. Cardiopatias Congênitas

Em cardiopatias congênitas como tetralogia de Fallot, comunicação interventricular ou anomalia de Ebstein, a ecocardiografia 3D fornece avaliação volumétrica precisa em geometrias atípicas, onde a ecocardiografia 2D falha. Isso é fundamental no planejamento cirúrgico e no seguimento longitudinal.^{26,27}

Tabela 3 – Quadro comparativo resumido

Método	Vantagem principal	Limitação	Valor prognóstico comparativo
FE 3D (Eco 3D)	Volumetria precisa, geometria completa	Requer boa imagem, software avançado	Elevado (independente, superior ao 2D)
Strain 2D (VDSLPL)	Fácil de obter, alta resolução temporal	Dependente de janela acústica e geometria	Moderado, valor reduzido comparado a FE 3D
RMC	Padrão de referência	Acesso limitado, custo e tempo elevados	Alto – referência para avaliação objetiva e prognóstica

Fonte: adaptado de Meng et al.²¹ RMC: ressonância magnética cardíaca; FE: fração de ejeção.

Tabela 4 – Principais aplicações clínicas da ecocardiografia 3D do ventrículo direito

Cenário clínico	Aplicação ecocardiografia 3D do VD	Impacto clínico
Hipertensão pulmonar	Avaliação da FEVD e remodelamento do VD	Melhor estratificação de risco
Insuficiência tricúspide funcional	Análise do anel tricúspide e mecanismo de regurgitação	Auxilia no planejamento de intervenção percutânea
Cardiopatias congênitas	Quantificação de volumes e geometria do VD	Monitoramento longitudinal em patologias como T4F, VD sistêmico e Ebstein
Insuficiência cardíaca	Identificação precoce da disfunção do VD	Proporciona prognóstico independente
Intervenções estruturais	Informações anatômicas para o planejamento. Orientação em tempo real de dispositivos (ex: TriClip)	Suporte ao sucesso do procedimento

Fonte: Adaptada de Grapsa et al.,¹⁷ Prihadi et al.,¹⁹ Dragulescu et al.,²⁷ Agrícola et al.²⁹ FEVD: fração de ejeção do ventrículo direito; VD: ventrículo direito.

Tabela 5 – Parâmetros 3D do ventrículo direito e sua interpretação

Parâmetro 3D	Ponto de corte	Interpretação
Fração de ejeção do Ventrículo Direito (FEVD)	< 45%	Forte preditor de mortalidade em IC e HP
Volume sistólico final (VSF)	> 90 mL	Indica remodelamento adverso
Área do anel tricúspide	> 12 cm ² /m ²	Progressão de insuficiência tricúspide
Orifício regurgitante efetivo (EROA)	> 0,4 cm ²	Regurgitação tricúspide grave
Strain longitudinal do VD	< 16%	Disfunção subclínica, pior prognóstico

Fonte: Adaptado de Grapsa et al.,¹⁷ Molnar et al.,²⁸ Agrícola et al.,²⁹ Ishizu et al.³⁰ FEVD: fração de ejeção do ventrículo direito; VD: ventrículo direito; HP: Hipertensão Pulmonar; IC: insuficiência cardíaca; VSF: Volume Sistólico Final; EROA: área do orifício regurgitante efetivo.

D. Insuficiência Cardíaca com Disfunção de VD

A disfunção do VD na Insuficiência Cardíaca com Fração de Ejeção preservada (ICFep) ou reduzida (ICFer) está associada a pior prognóstico. A ecocardiografia 3D permite detectar precocemente redução da FEVD, mesmo antes de alterações significativas no TAPSE ou na velocidade da onda S' do anel tricúspide.²⁸

E. Intervenções Estruturais e Monitoramento Pós-Procedimento

Procedimentos como implante percutâneo de válvula pulmonar, clipagem tricúspide e implante percutâneo de válvula tricúspide, e oclusão de defeitos do septo interatrial requerem avaliação pré e pós-procedimento do VD, da valva tricúspide e dos diâmetros dos defeitos septais o que

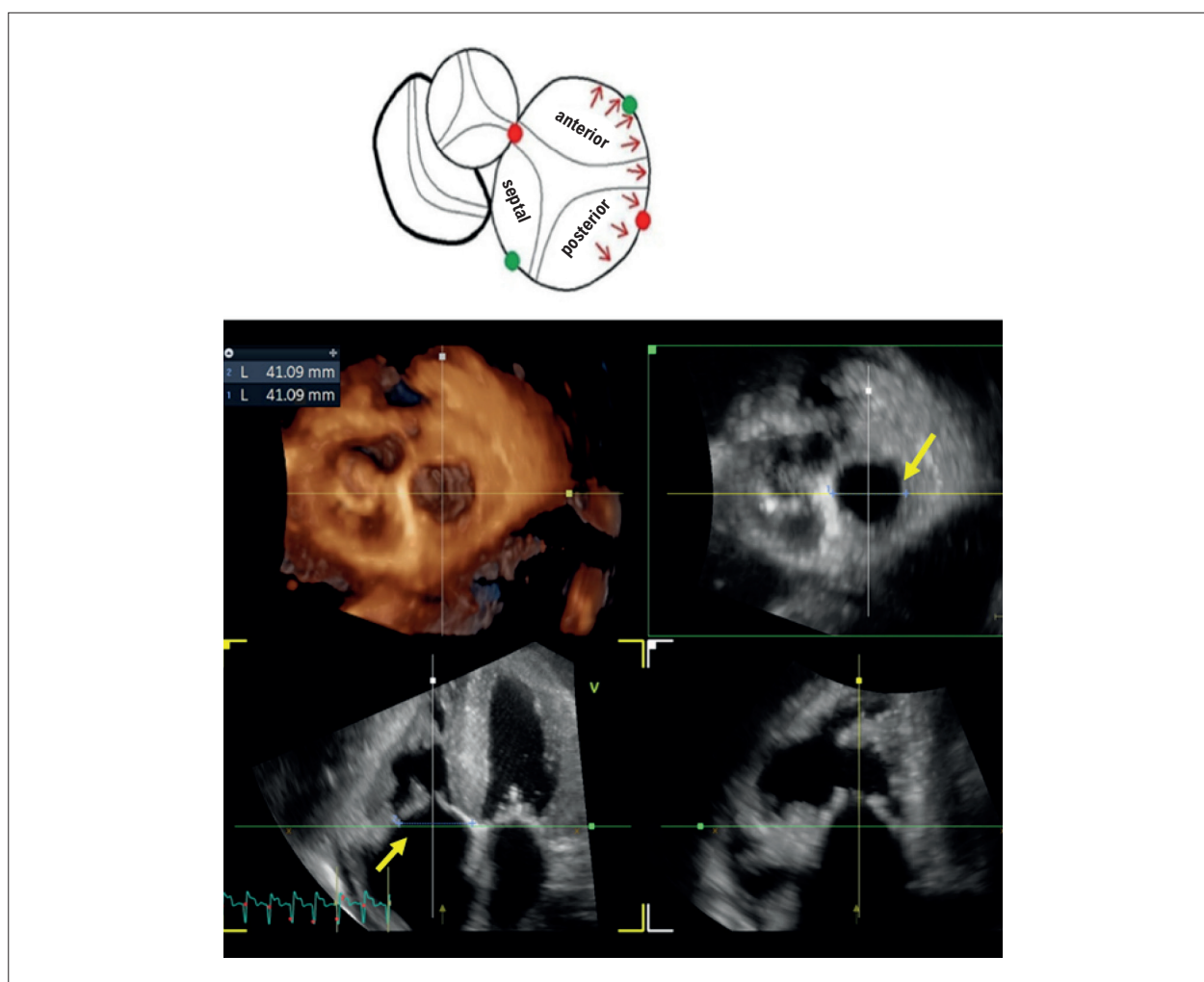


Figura 3 – Imagem evidenciando dilatação anteroposterior do anel tricúspide vista à ecocardiografia bidimensional e tridimensional (setas amarelas). Acima ilustração mostrando disposição anatômica do anel.

é realizado com maior acurácia pela ecocardiografia 3D em tempo real.²⁹

Além disso, durante os procedimentos para tratamento da insuficiência tricúspide, é essencial uma adequada demonstração anatômica da valva, bem como da interação entre as próteses e o tecido valvar, tornando-se essencial a utilização da ecocardiografia tridimensional transesofágica.

Limitações Técnicas e Perspectivas Futuras

Apesar dos avanços significativos, a ecocardiografia 3D ainda enfrenta desafios técnicos que limitam sua aplicação rotineira em todos os cenários clínicos. No entanto, o desenvolvimento de novas tecnologias e algoritmos de inteligência artificial tem impulsionado sua evolução contínua.

A. Resolução Temporal e Espacial

Uma das limitações mais reconhecidas da ecocardiografia 3D em relação à 2D é a menor resolução temporal. A aquisição com múltiplos batimentos é necessária para melhorar a resolução

temporal, especialmente quando a aquisição envolve volumes amplos. Entretanto, esse tipo de aquisição pode introduzir artefatos em pacientes não cooperativos, com instabilidade hemodinâmica, taquiarritmias ou padrão respiratório irregular.¹⁴ Além disso, a resolução espacial ainda é inferior à da ressonância magnética, podendo dificultar a delimitação endocárdica em VD com trabeculações intensas ou anatomia distorcida.^{30,31}

B. Dependência da Janela Acústica

A ecocardiografia 3D continua limitada pela qualidade da janela acústica. Em pacientes com DPOC, obesidade ou em ventilação mecânica, a imagem obtida pode ser inadequada para reconstrução precisa dos volumes do VD. Nesses casos, mesmo com softwares avançados, a análise pode ser inviável ou imprecisa.^{7,32}

C. Variabilidade e Curva de Aprendizado

Embora a acurácia da ecocardiografia 3D tenha sido demonstrada em estudos multicêntricos, ainda existe

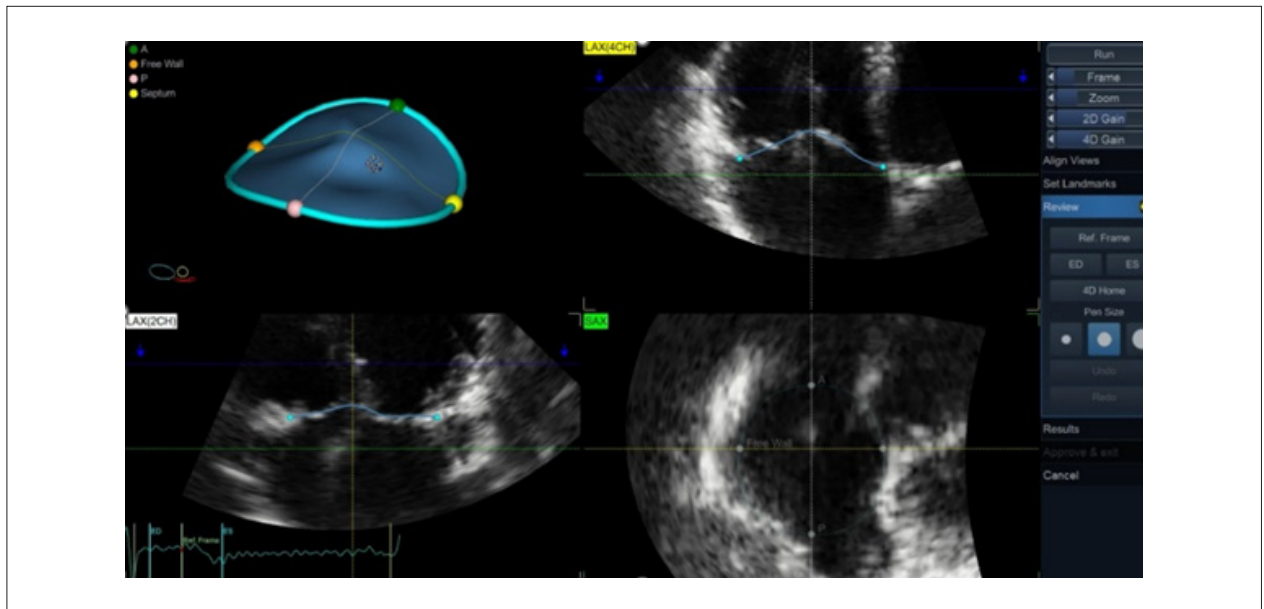


Figura 4 – Reconstrução multiplanar tridimensional da valva tricúspide por ecocardiografia 3D, evidenciando o modelo espacial do anel com pontos anatômicos de referência (ápice, septo, parede livre e comissuras). Os cortes ortogonais (LAX 4 câmaras, LAX 2 câmaras e SAX transversa) permitem o ajuste preciso do contorno e a análise detalhada da geometria valvar.

variabilidade interobservador significativa em centros com menor experiência. A curva de aprendizado para aquisição, reconstrução e interpretação é mais longa que a da ecocardiografia 2D, exigindo treinamento específico.³³

D. Tempo de Processamento e Workflow

O tempo de pós-processamento, apesar de reduzido com os softwares modernos, ainda representa uma barreira prática. Em ambientes de alta rotatividade como UTIs ou ambulatórios, o uso rotineiro pode ser dificultado pela necessidade de estações de trabalho com softwares específicos e operadores treinados.¹⁶

E. Perspectivas Futuras

As inovações mais promissoras no campo incluem:

- **Integração com inteligência artificial (IA):** A integração da IA na ecocardiografia tem acelerado a quantificação 3D do ventrículo direito: *Genovese et al.* demonstraram que softwares baseados em *machine learning* automatizam o contorno do VD, reduzindo a variabilidade interobservador e acelerando o tempo de análise até 15 segundos, sem edição manual, em cerca de 32 % dos casos, com excelente reprodutibilidade.¹¹ Uma revisão recente mostrou que a IA impacta todas as etapas do fluxo de trabalho — desde a aquisição automática de cortes padronizados até a interpretação funcional automatizada, promovendo maior eficiência clínica.³⁴
- **Ecocardiografia portátil com 3D (handheld ultrasound devices-HUDs):** Embora a maioria dos

estudos com dispositivos portáteis foque no ventrículo esquerdo, os resultados suportam a viabilidade da quantificação volumétrica automatizada do ventrículo direito, utilizando inteligência artificial ou algoritmos integrados em dispositivos portáteis. Isso reforça a discussão sobre o uso da ecocardiografia 3D no contexto clínico de emergência a beira-leito e em UTI.³⁵

- **Fusão multimodal com RM e TC:** A ecocardiografia 3D tem avançado além da quantificação isolada do VD, atuando como plataforma de integração multimodal com RMC e TC, especialmente em cenários complexos de cardiopatias congênitas e intervenções percutâneas. Uma revisão recente destaca essa utilidade clínica emergente, enfatizando a combinação de dados anatômicos e funcionais de múltiplas modalidades para planejamento e seguimento.³⁶
- **Avaliação de deformação tridimensional (strain 3D):** O *speckle tracking* tridimensional, uma tecnologia relativamente recente na ecocardiografia 3D, foi desenvolvido para permitir a análise simultânea da deformação miocárdica e a quantificação de volumes e fração de ejeção do Ventrículo Direito (VD) em um único conjunto de dados volumétricos.³⁰ Além da quantificação global, o *strain* 3D possibilita a avaliação do movimento regional da parede do VD, revelando padrões de deformação segmentar heterogêneos — achados que podem ter relevância prognóstica e auxiliar na compreensão da mecânica ventricular em diferentes contextos clínicos. Essa abordagem, portanto, representa um avanço potencialmente útil para complementar a análise funcional do VD, especialmente em doenças que cursam com remodelamento complexo.³⁰

- **Modelagem Tridimensional do VD: Integração Técnica e Aplicação Clínica Avançada:** modelagem tridimensional do VD, com base na ecocardiografia 3D, representa um salto tecnológico na avaliação morfofuncional cardíaca. Com algoritmos de segmentação e reconstrução volumétrica, é possível construir modelos anatômicos precisos do VD — incluindo suas regiões de entrada, corpo e via de saída — sem depender de suposições geométricas bidimensionais. Essas reconstruções têm alta fidelidade, com excelente acurácia para volumes e FEVD.^{37,16} Além de reproduzir a anatomia com alta precisão, esses modelos permitem gerar mapas segmentares de strain, possibilitando a análise do comportamento regional do miocárdio e identificação de discinesias ou áreas com alteração contrátil típica de cardiopatias congênitas ou disfunções valvares.³⁸ O uso destes métodos em pacientes com sobrecarga de volume ou pressão — por exemplo, em hipertensão pulmonar ou regurgitação valvar — já demonstrou utilidade na caracterização geométrica e funcional, com impacto direto na estratificação de risco e planejamento terapêutico.³⁹ No campo da educação médica e planejamento cirúrgico, modelos 3D têm sido integrados em ferramentas de realidade aumentada e sistemas de impressão 3D, possibilitando simulação anatômica personalizada para treinamento e para suporte à decisão interprofissional em casos complexos.⁴⁰
- **Auxílio no implante de dispositivos de assistência ventricular:** Em uma publicação recente, a avaliação ecocardiográfica tridimensional dos volumes e formato do VE e do VD é relatada como útil para descrever o impacto do dispositivo de assistência ventricular esquerda (DAVE) no coração.²⁵ A FEVD e a deformação da parede livre do VD derivadas da ecocardiografia tridimensional foram associadas à insuficiência do VD e ao desfecho a longo prazo em pacientes submetidos a implante de DAVE. Esses parâmetros têm o potencial de serem preditores de insuficiência cardíaca direita na cirurgia de DAVE.⁴¹

Conclusões

A ecocardiografia tridimensional representa uma das inovações mais relevantes na avaliação funcional e anatômica do VD na prática clínica moderna. Ao superar limitações inerentes à ecocardiografia bidimensional, especialmente relacionadas à complexidade geométrica do VD, o método oferece quantificação volumétrica direta, reprodutível e com excelente correlação com a ressonância magnética cardíaca — padrão de referência para avaliação da função e volume ventricular.

Sua aplicação clínica abrange desde o diagnóstico precoce da disfunção ventricular direita até o seguimento de terapias estruturais e a estratificação de risco em diversas cardiopatias, com parâmetros como fração de ejeção, volume sistólico final e área do anel tricúspide demonstrando valor prognóstico consistente.

Apesar de limitações técnicas ainda existentes, como menor resolução temporal, dependência de janela acústica e necessidade de curva de aprendizado, os avanços em inteligência artificial, automação da análise e miniaturização dos transdutores abrem perspectivas promissoras para expansão de seu uso em larga escala.

Diante disso, recomenda-se fortemente a incorporação progressiva da ecocardiografia 3D na rotina de laboratórios de imagem cardiovascular, especialmente na avaliação do VD, como ferramenta diagnóstica e prognóstica de primeira linha. O domínio técnico e interpretativo desse método será, nos próximos anos, um diferencial importante na prática do ecocardiografista moderno.

Agradecimentos

Os autores agradecem às equipes do laboratório de ecocardiografia do INCOR e do grupo Fleury pelo suporte técnico. Agradecem também aos colegas que contribuíram com sugestões e revisões críticas que aprimoraram a qualidade do manuscrito.

Este estudo não recebeu apoio financeiro direto de agências de fomento públicas ou privadas.

Contribuição dos Autores

Concepção e desenho da pesquisa e revisão crítica do manuscrito quanto ao conteúdo intelectual importante: Politi TR, Barretto RBM, Sbrano JCN, Le Bihan DCS, Mathias Jr. W; obtenção de dados: Politi TR, Barretto RBM, Le Bihan DCS, Mathias Jr. W; análise e interpretação dos dados: Politi TR, Sbrano JCN, Le Bihan DCS, Mathias Jr. W; redação do manuscrito: Politi TR.

Potencial Conflito de Interesse

Declaro não haver conflito de interesses pertinentes.

Fontes de Financiamento

O presente estudo não teve fontes de financiamento externas.

Vinculação Acadêmica

Não há vinculação deste estudo a programas de pós-graduação.

Aprovação Ética e Consentimento Informado

Este artigo não contém estudos com humanos ou animais realizados por nenhum dos autores.

Uso de Inteligência Artificial

Os autores não utilizaram ferramentas de inteligência artificial no desenvolvimento deste trabalho.

Disponibilidade de Dados

Conteúdos subjacentes ao texto da pesquisa estão contidos no manuscrito.

Referências

1. Shiota T, Jones M, Chikada M, Fleishman CE, Castellucci JB, Cotter B, et al. Real-Time Three-Dimensional Echocardiography for Determining Right Ventricular Stroke Volume in an Animal Model of Chronic Right Ventricular Volume Overload. *Circulation*. 1998;97(19):1897-900. doi: 10.1161/01.cir.97.19.1897.
2. Nesser HJ, Tkalec W, Patel AR, Masani ND, Niel J, Markt B, et al. Quantitation of Right Ventricular Volumes and Ejection Fraction by Three-Dimensional Echocardiography in Patients: Comparison with Magnetic Resonance Imaging and Radionuclide Ventriculography. *Echocardiography*. 2006;23(8):666-80. doi: 10.1111/j.1540-8175.2006.00286.x.
3. Shiota T. 3D Echocardiography. 3rd ed. Philadelphia: Elsevier; 2021.
4. Focardi M, Cameli M, Carbone SF, Massoni A, De Vito R, Lisi M, et al. Traditional and Innovative Echocardiographic Parameters for the Analysis of Right Ventricular Performance in Comparison with Cardiac Magnetic Resonance. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2015;16(1):47-52. doi: 10.1093/ehjci/jeu156.
5. Rudski LG, Lai WW, Afilalo J, Hua L, Handschumacher MD, Chandrasekaran K, et al. Guidelines for the Echocardiographic Assessment of the Right Heart in Adults: A Report from the American Society of Echocardiography Endorsed by the European Association of Echocardiography, a Registered Branch of the European Society of Cardiology, and the Canadian Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr*. 2010;23(7):685-713. doi: 10.1016/j.echo.2010.05.010.
6. Haddad F, Hunt SA, Rosenthal DN, Murphy DJ. Right Ventricular Function in Cardiovascular Disease, Part I: Anatomy, Physiology, Aging, and Functional Assessment of the Right Ventricle. *Circulation*. 2008;117(11):1436-48. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.107.653576.
7. Lang RM, Badano LP, Mor-Avi V, Afilalo J, Armstrong A, Ernande L, et al. Recommendations for Cardiac Chamber Quantification by Echocardiography in Adults: An Update from the American Society of Echocardiography and the European Association of Cardiovascular Imaging. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2015;16(3):233-70. doi: 10.1093/ehjci/jev014.
8. Maffessanti F, Muraru D, Esposito R, Gripari P, Ermacora D, Santoro C, et al. Age-, Body Size-, and Sex-Specific Reference Values for Right Ventricular Volumes and Ejection Fraction by Three-Dimensional Echocardiography: A Multicenter Echocardiographic Study in 507 Healthy Volunteers. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2013;6(5):700-10. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.113.000706.
9. Mukherjee M, Rudski LG, Addetia K, Afilalo J, D'Alto M, Freed BH, et al. Guidelines for the Echocardiographic Assessment of the Right Heart in Adults and Special Considerations in Pulmonary Hypertension: Recommendations from the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr*. 2025;38(3):141-86. doi: 10.1016/j.echo.2025.01.006.
10. Soliman-Aboumarie H, Joshi SS, Cameli M, Michalski B, Manka R, Haugaa K, et al. EACVI Survey on the Multi-Modality Imaging Assessment of the Right Heart. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2022;23(11):1417-22. doi: 10.1093/ehjci/jeac183.
11. Genovese D, Rashedi N, Weinert L, Narang A, Addetia K, Patel AR, et al. Machine Learning-Based Three-Dimensional Echocardiographic Quantification of Right Ventricular Size and Function: Validation Against Cardiac Magnetic Resonance. *J Am Soc Echocardiogr*. 2019;32(8):969-77. doi: 10.1016/j.echo.2019.04.001.
12. Tamborini G, Marsan NA, Gripari P, Maffessanti F, Brusoni D, Muratori M, et al. Reference Values for Right Ventricular Volumes and Ejection Fraction with Real-Time Three-Dimensional Echocardiography: Evaluation in a Large Series of Normal Subjects. *J Am Soc Echocardiogr*. 2010;23(2):109-15. doi: 10.1016/j.echo.2009.11.026.
13. Maceira AM, Prasad SK, Khan M, Pennell DJ. Reference Right Ventricular Systolic and Diastolic Function Normalized to Age, Gender and Body Surface Area from Steady-State Free Precession Cardiovascular Magnetic Resonance. *Eur Heart J*. 2006;27(23):2879-88. doi: 10.1093/eurheartj/ehl336.
14. Lang RM, Badano LP, Tsang W, Adams DH, Agricola E, Buck T, et al. EAE/ASE Recommendations for Image Acquisition and Display Using Three-Dimensional Echocardiography. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2012;13(1):1-46. doi: 10.1093/ehjci/jeu316.
15. Wang S, Wang S, Zhu Q, Wang Y, Li G, Kong F, et al. Reference Values of Right Ventricular Volumes and Ejection Fraction by Three-Dimensional Echocardiography in Adults: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Front Cardiovasc Med*. 2021;8:709863. doi: 10.3389/fcvm.2021.709863.
16. Muraru D, Spadotto V, Cecchetto A, Romeo G, Aruta P, Ermacora D, et al. New Speckle-Tracking Algorithm for Right Ventricular Volume Analysis from Three-Dimensional Echocardiographic Data Sets: Validation with Cardiac Magnetic Resonance and Comparison with the Previous Analysis Tool. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2016;17(11):1279-89. doi: 10.1093/ehjci/jev309.
17. Grapsa J, O'Regan DP, Pavlopoulos H, Durighel G, Dawson D, Nihoyannopoulos P. Right Ventricular Remodelling in Pulmonary Arterial Hypertension with Three-Dimensional Echocardiography: Comparison with Cardiac Magnetic Resonance Imaging. *Eur J Echocardiogr*. 2010;11(1):64-73. doi: 10.1093/ejehocardi/jep169.
18. Jenkins C, Chan J, Bricknell K, Strudwick M, Marwick TH. Reproducibility of Right Ventricular Volumes and Ejection Fraction Using Real-Time Three-Dimensional Echocardiography: Comparison with Cardiac MRI. *Chest*. 2007;131(6):1844-51. doi: 10.1378/chest.06-2143.
19. Prihadi EA, van der Bijl P, Dietz M, Abou R, Vollema EM, Marsan NA, et al. Prognostic Implications of Right Ventricular Free Wall Longitudinal Strain in Patients with Significant Functional Tricuspid Regurgitation. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2019;12(3):e008666. doi: 10.1161/CIRCIMAGING.118.008666.
20. Kitano T, Kovács A, Nabeshima Y, Tokodi M, Fábán A, Lakatos BK, et al. Prognostic Value of Right Ventricular Strains Using Novel Three-Dimensional Analytical Software in Patients with Cardiac Disease. *Front Cardiovasc Med*. 2022;9:837584. doi: 10.3389/fcvm.2022.837584.
21. Meng Y, Zhu S, Xie Y, Zhang Y, Qian M, Gao L, et al. Prognostic Value of Right Ventricular 3D Speckle-Tracking Strain and Ejection Fraction in Patients with HFpEF. *Front Cardiovasc Med*. 2021;8:694365. doi: 10.3389/fcvm.2021.694365.
22. Vijiati A, Onciul S, Guzu C, Verinceanu V, Bătăiță V, Deaconu S, et al. The Prognostic Value of Right Ventricular Longitudinal Strain and 3D Ejection Fraction in Patients with Dilated Cardiomyopathy. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2021;37(11):3233-44. doi: 10.1007/s10554-021-02322-z.
23. Li Y, Wang T, Haines P, Li M, Wu W, Liu M, et al. Prognostic Value of Right Ventricular Two-Dimensional and Three-Dimensional Speckle-Tracking Strain in Pulmonary Arterial Hypertension: Superiority of Longitudinal Strain Over Circumferential and Radial Strain. *J Am Soc Echocardiogr*. 2020;33(8):985-94.e1. doi: 10.1016/j.echo.2020.03.015.
24. Erley J, Tanacli R, Genovese D, Tapaskar N, Rashedi N, Bucius P, et al. Myocardial Strain Analysis of the Right Ventricle: Comparison of Different Cardiovascular Magnetic Resonance and Echocardiographic Techniques. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2020;22(1):51. doi: 10.1186/s12968-020-00647-7.
25. Addetia K, Uriel N, Maffessanti F, Sayer G, Adatya S, Kim GH, et al. 3D Morphological Changes in LV and RV during LVAD Ramp Studies. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2018;11(2 Pt 1):159-69. doi: 10.1016/j.jcmg.2016.12.019.
26. van der Zwaan HB, Helbing WA, McChie JS, Geleijnse ML, Luijnenburg SE, Roos-Hesselink JW, et al. Clinical Value of Real-Time Three-Dimensional Echocardiography for Right Ventricular Quantification in Congenital Heart Disease: Validation with Cardiac Magnetic Resonance Imaging. *J Am Soc Echocardiogr*. 2010;23(2):134-40. doi: 10.1016/j.echo.2009.12.001.

27. Dragulescu A, Grosse-Wortmann L, Fackoury C, Riffle S, Weiss M, Jaeggi E, et al. Echocardiographic Assessment of Right Ventricular Volumes after Surgical Repair of Tetralogy of Fallot: Clinical Validation of a New Echocardiographic Method. *J Am Soc Echocardiogr*. 2011;24(11):1191-8. doi: 10.1016/j.echo.2011.08.006.
28. Molnár AÁ, Sánta A, Merkely B. Echocardiography Imaging of the Right Ventricle: Focus on Three-Dimensional Echocardiography. *Diagnostics*. 2023;13(15):2470. doi: 10.3390/diagnostics13152470.
29. Agricola E, Asmarats L, Maisano F, Cavalcante JL, Liu S, Milla F, et al. Imaging for Tricuspid Valve Repair and Replacement. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2021;14(1):61-111. doi: 10.1016/j.jcmg.2020.01.031.
30. Ishizu T, Seo Y, Atsumi A, Tanaka YO, Yamamoto M, Machino-Ohtsuka T, et al. Global and Regional Right Ventricular Function Assessed by Novel Three-Dimensional Speckle-Tracking Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr*. 2017;30(12):1203-13. doi: 10.1016/j.echo.2017.08.007.
31. Wu VC, Takeuchi M. Three-Dimensional Echocardiography: Current Status and Real-Life Applications. *Acta Cardiol Sin*. 2017;33(2):107-18. doi: 10.6515/acs20160818a.
32. Herberg U, Smit F, Winkler C, Dalla-Pozza R, Breuer J, Laser KT. Real-Time 3D-Echocardiography of the Right Ventricle-Paediatric Reference Values for Right Ventricular Volumes Using Knowledge-Based Reconstruction: A Multicentre Study. *Quant Imaging Med Surg*. 2021;11(7):2905-17. doi: 10.21037/qims-20-1155.
33. Pinedo M, Villacorta E, Tapia C, Arnold R, López J, Revilla A, et al. Inter- and Intra-Observer Variability in the Echocardiographic Evaluation of Right Ventricular Function. *Rev Esp Cardiol*. 2010;63(7):802-9. doi: 10.1016/s1885-5857(10)70165-1.
34. Zhou J, Du M, Chang S, Chen Z. Artificial Intelligence in Echocardiography: Detection, Functional Evaluation, and Disease Diagnosis. *Cardiovasc Ultrasound*. 2021;19(1):29. doi: 10.1186/s12947-021-00261-2.
35. de Raat FM, van Houte J, Montenij LJ, Bouwmeester S, Felix SEA, Bingley P, et al. Evaluation of the Image Quality and Validity of Handheld Echocardiography for Stroke Volume and Left Ventricular Ejection Fraction Quantification: A Method Comparison Study. *Int J Cardiovasc Imaging*. 2024;40(1):15-25. doi: 10.1007/s10554-023-02942-7.
36. Randazzo M, Maffessanti F, Kotta A, Grapsa J, Lang RM, Addetia K. Added Value of 3D Echocardiography in the Diagnosis and Prognostication of Patients with Right Ventricular Dysfunction. *Front Cardiovasc Med*. 2023;10:1263864. doi: 10.3389/fcvm.2023.1263864.
37. Hameed A, Condliffe R, Swift AJ, Alabed S, Kiely DG, Charalampopoulos A. Assessment of Right Ventricular Function—a State of the Art. *Curr Heart Fail Rep*. 2023;20(3):194-207. doi: 10.1007/s11897-023-00600-6.
38. Addetia K, Lang RM. Decoding the Right Ventricle in 3 Dimensions. *JAMA Cardiol*. 2018;3(10):910-1. doi: 10.1001/jamacardio.2018.2452.
39. Otani K, Nabeshima Y, Kitano T, Takeuchi M. Accuracy of Fully Automated Right Ventricular Quantification Software with 3D Echocardiography: Direct Comparison with Cardiac Magnetic Resonance and Semi-Automated Quantification Software. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2020;21(7):787-95. doi: 10.1093/ehjci/jez236.
40. Muraru D. 22nd Annual Feigenbaum Lecture: Right Heart, Right Now: The Role of Three-Dimensional Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr*. 2022;35(9):893-909. doi: 10.1016/j.echo.2022.05.011.
41. Magunia H, Dietrich C, Langer HF, Schibilsky D, Schlensak C, Rosenberger P, et al. 3D Echocardiography Derived Right Ventricular Function is Associated with Right Ventricular Failure and Mid-Term Survival after Left Ventricular Assist Device Implantation. *Int J Cardiol*. 2018;272:348-55. doi: 10.1016/j.ijcard.2018.06.026.

