

¿Cómo valoramos ecocardiográficamente el ventrículo derecho?

**Belén Coromoto Verdugo¹,
Blanca Serrano²,
Andere Ona Marco Verdugo³ y
Iolanda Navalón⁴**

¹LV, acreditada AVEPA en Cardiología y Medicina Interna, Master en Medicina Interna por el Animal Medical Center de Nueva York, responsable del servicio de Cardiología de Coromoto

²LV, Dpto. de cardiología Hospital Veterinario AniCura Ars Veterinaria

³Estudiante 4º curso Veterinaria Universidad Leipzig, Alemania

⁴LV, Dipl. ECVIM-CA Cardiología, responsable de Dpto. de cardiología AniCura Ars Veterinaria

Contacto: inavalon@hotmail.com

Palabras clave: Ventrículo derecho, atrio derecho, ecocardiografía, ecocardiografía 3D

Keywords: Right ventricle, right atrium, echocardiography, 3D echocardiography

Resumen

Cada vez se reconoce más el papel crucial del ventrículo derecho (VD) en la determinación de la fisiopatología y del pronóstico en múltiples patologías. El VD normal es anatómica y funcionalmente diferente del ventrículo izquierdo, lo que impide la extrapolación directa de nuestro conocimiento del funcionamiento del lado izquierdo al corazón derecho.

En el pasado la evaluación de la estructura y función del VD mediante ecocardiografía ha sido en gran parte, cualitativa. Los enfoques más recientes enfatizan la cuantificación de la estructura del VD desde múltiples vistas ecocardiográficas y la cuantificación de su función. Actualmente se está implementando a la ecocardiografía tradicional nuevas técnicas en imágenes tridimensionales y de deformación miocárdica que ayudarán a guiar el diagnóstico y las opciones de tratamiento.

El objetivo de este artículo es ofrecer una perspectiva clínica sobre la estructura y función del VD y hacer un resumen de las medidas más comúnmente utilizadas junto con sus fortalezas y debilidades.

Introducción

La ecocardiografía bidimensional (2D) es una parte indispensable e integral de la evaluación clínica de pacientes con enfermedades cardíacas, sin embargo, la mayoría de los parámetros derivados del examen ecocardiográfico se centran en la función del ventrículo izquierdo (VI), y se ha prestado menos atención al estudio del VD.

Inicialmente se consideraba que la importancia del VD estaba subordinada al VI¹. Esto se debe a que se sabe menos acerca de las funciones fisiológicas y pronósticas del VD, de hecho, la propia morfología del VD supone un desafío. Su forma tridimensional (3D) compleja, es menos susceptible a supuestos geométricos, presenta regiones de entrada y salida separadas, además de trabeculaciones endocárdicas prominentes y una gran dependencia de la carga. Por todo

Abstract

There is increasing recognition of the crucial role of the right ventricle (RV) in determining physiopathology and prognosis in multiple conditions. The normal RV is anatomically and functionally different from the left ventricle, which precludes direct extrapolation of our knowledge of the functioning of the left side to the right heart.

Assessment of RV structure and function by echocardiography has largely been qualitative in the past. More recent approaches emphasise the quantification of RV structure from multiple echocardiographic views and quantification of RV function. New techniques in three-dimensional images and myocardial deformation are currently being implemented to traditional ultrasound that will help guide diagnosis and treatment options.

The goal of this paper is to offer a clinical perspective on RV structure and function and summarize the most commonly used measures along with their strengths and weaknesses.

esto, los parámetros de la función del VD determinados en 2D no representan la función global de todo el VD y es casi imposible estimar con precisión el volumen y la fracción de eyección del VD (FEVD) a partir de las vistas 2D.

La valoración ecocardiográfica del VD es importante sobre todo en algunas cardiopatías congénitas, en la hipertensión pulmonar (HP), en enfermedades valvulares, en cardiomiopatías y en enfermedades pulmonares crónicas, entre otras. No obstante, la función del VD también es esencial en pacientes cuya patología es causada por disfunción de la cavidad izquierda.

En medicina humana los avances recientes en el entendimiento de la función del VD han dado pasos importantes estableciendo valores de referencia, que nos permiten proporcionar

elementos predictivos en la evolución de los pacientes. Estudios exhaustivos sobre el corazón derecho nos dicen que la evaluación de la función del VD juega un papel fundamental en la predicción del estado clínico, la morbilidad y la mortalidad en una gran variedad de enfermedades cardiovasculares. Esto afecta de manera similar a pequeños animales, incluyendo aquellas enfermedades consideradas tradicionalmente como específicas del corazón izquierdo.

Los ventrículos funcionan como una sola unidad íntimamente ligada por miofibras superficiales, el tabique interventricular y el pericardio. Valorar la función del VI y la función del VD por separado es erróneo e incompleto. Por lo tanto, se recomienda la valoración de la funcionalidad de ambos ventrículos durante la evaluación clínica de rutina, independientemente del proceso patológico subyacente. En los últimos años se han publicado numerosos artículos que estudian los índices ecocardiográficos de morfología y función del VD.

Anatomía del ventrículo derecho

El corazón se encuentra en el mediastino medio, a la altura de las vértebras torácicas T5-T8. El VD es la cámara cardíaca situada más anteriormente. Es de paredes delgadas con prominentes trabéculas y geometría compleja.

El VD parece envolver parte del VI, con una forma que se asemeja a una media luna triangular unida al ventrículo izquierdo anterior e inferiormente en el tabique interventricular, compartiendo el mismo borde. El VD se puede dividir anatómicamente en 3 partes: 1. la entrada, que consta de la válvula tricúspide, las cuerdas tendinosas y los músculos papilares; 2. el miocardio apical trabeculado; y 3. el infundíbulo o cono, que se considera el tracto de salida del VD.

La orientación de las miofibras del VD y su disposición en capas es la responsable del patrón de contracción característico de esta cámara. Las capas de cardiomiocitos están alineadas de manera diferente y crean un patrón de contracción del VD peristáltico, o en forma de onda, que comienza a la altura de la tricúspide, progresando hacia el infundíbulo y el tracto de salida. El movimiento longitudinal que se

observa de la base hacia el ápice se acompaña por un “efecto fuelle” de la pared libre hacia el tabique interventricular.

Fisiología del ventrículo derecho

El corazón derecho recibe el retorno venoso sistémico y bombea sangre a la circulación pulmonar, mientras que el corazón izquierdo recibe el retorno venoso pulmonar y bombea sangre a la circulación sistémica. En teoría, el corazón derecho bombea aproximadamente la misma cantidad de sangre que el corazón izquierdo en cada ciclo cardíaco. El corazón derecho y el corazón izquierdo están conectados en serie y una interrupción en cualquier punto de la circulación puede afectar tanto a un lado como al otro. La pared del VD es más delgada que la del VI y la cámara es muy sensible a la precarga.

La función sistólica del VD es dependiente de la precarga, la postcarga, el estado inotrópico miocárdico, el ritmo y la frecuencia cardíaca, al igual que la del VI. La ley de Frank-Starling opera también en el VD, donde un aumento en la precarga estira la pared, aumentando la contractilidad del miocardio. La precarga del VD se ve afectada por el estado del volumen intravascular, la distensibilidad ventricular, la relajación ventricular, la frecuencia cardíaca y la presión de llenado.

En condiciones normales, el corazón derecho bombea sangre poco oxigenada con una presión mucho más baja en comparación con el izquierdo, por lo que el corazón derecho tiene una impedancia más baja y una distensibilidad más alta. El tiempo de contracción isovolumétrica del VD es más corto que el del VI, también debido a que la presión del VD puede aumentar más rápido para superar la baja presión de la arteria pulmonar (AP)⁴. Un estudio de las curvas de presión del VD muestra un pico temprano y una presión que desciende rápidamente en contraste con el contorno redondeado de las curvas de presión del VI⁵. La postcarga del VD está relacionada con la resistencia vascular pulmonar (RVP) y la presión de la AP.

En ausencia de estenosis pulmonar y/o tricúspidea, la presión sistólica del VD (PSVD) se puede determinar a partir de la velocidad máxima de regurgitación tricúspidea (RT) y de la presión de

la aurícula derecha (AD), utilizando la ecuación de Bernoulli simplificada: $PSVD=4x(velocidad RT)^2 + presión de la AD$. En la práctica habitual, la PSVD se mide con mucha frecuencia y el valor de reposo normal se define como < 36 mmHg (una velocidad pico de la TR < 3 m/s y suponiendo una presión de AD en condiciones normales de 3-5 mmHg). La presión sistólica de la AP se calcula a partir de la velocidad de la regurgitación de la tricúspide, y la presión diastólica de la AP se obtiene mediante la velocidad de regurgitación pulmonar telediastólica. La presión arterial media normal es de unos 10 - 15 mmHg.⁶

En estados patológicos que afectan principalmente al VD, tanto la sobrecarga de volumen como la de presión, pueden causar hipertrofia y agrandamiento del VD. En las enfermedades que provocan una sobrecarga de presión del VD, como sucede en el Síndrome de Eisenmenger o en la hipertensión pulmonar (HP) grave, la pared se hipertrofia y en casos extremos, la forma de los ventrículos se invierte y el ventrículo izquierdo adquiere forma de "D".⁷

Evaluación de la función del ventrículo derecho mediante ecocardiografía

A pesar del desafío que resulta la obtención de imágenes del VD, actualmente la ecocardiografía representa el método más práctico y utilizado para la evaluación clínica del ventrículo derecho en perros y gatos. Hay numerosos índices ecocardiográficos y valores de referencia para la evaluación cuantitativa de la función y el tamaño del VD, tanto en medicina humana como en veterinaria.

Una evaluación ecocardiográfica debe incluir un estudio de la morfología del atrio derecho (AD), las dimensiones del ventrículo, del tracto de salida y del grosor de la pared del VD, la función sistólica y una estimación de la función diastólica.

La ecocardiografía permite la detección fiable de una dilatación moderada o grave del VD. En circunstancias fisiológicas el VD es un tercio del tamaño del ventrículo izquierdo y en cambio, en dilataciones graves puede superar incluso el tamaño del VI. Sin embargo, es más difícil diferenciar "normal" de "patológico" cuando el VD está levemente dilatado. En tales situaciones, los parámetros cuantitativos se vuelven muy importantes.

Para mantener un estándar en las medidas es necesario seguir una serie de premisas en cada examen. Para imágenes en modo B en las que la válvula tricúspide es visible, la telediástole se define como el primer fotograma en el que la válvula tricúspide está cerrada. Para modo M o en las imágenes bidimensionales en las que la válvula tricúspide no es visible, se determina el final de la diástole a través del electrocardiograma (inicio del QRS). El final de la sístole es la imagen que precede a la apertura de la válvula tricúspide. En las imágenes en modo B, para la medición de las dimensiones de la cámara, se utiliza la técnica *inner Edge to inner Edge* (del interior del borde de la pared al interior del borde de la pared). En la imagen paraesternal derecha para las mediciones del eje largo, el borde endocárdico más alejado del transductor se incluye, pero no el más proximal. En las mediciones apicales del grosor de la pared, el pericardio se debe incluir.

La mayoría los índices del VD se obtienen de la vista 4 cámaras paraesternal izquierda optimizada para el corazón derecho (CCPI-VD). La optimización puede implicar un ligero movimiento craneal del transductor y debe evitarse acortar el VD. La luz se ve triangular y debe evitarse la visualización del tracto de salida del ventrículo izquierdo.³

Dimensiones lineales VD

Arteria pulmonar principal: Aorta

Esta medida se realiza al inicio de la diástole, en eje corto paraesternal derecho, optimizada para la visualización de la válvula pulmonar. El diámetro de la aorta se mide con una línea paralela de la comisura de la coronaria izquierda y a la no coronaria. El diámetro de la arteria pulmonar principal se obtiene conectado los puntos de "juntura" de la válvula. Ambas medidas se toman en el primer fotograma diastólico durante el cual estos puntos de referencia valvulares son visibles. **Figura 1**

Esta medida no está influenciada por el tamaño del perro. Dependiendo el artículo consultado el valor medio está entre 0.85 y 1,03.^{8,9} El aumento de este valor está relacionado con situaciones patológicas que determinan una dilatación de la arteria pulmonar principal como puede ser la hipertensión pulmonar.⁹

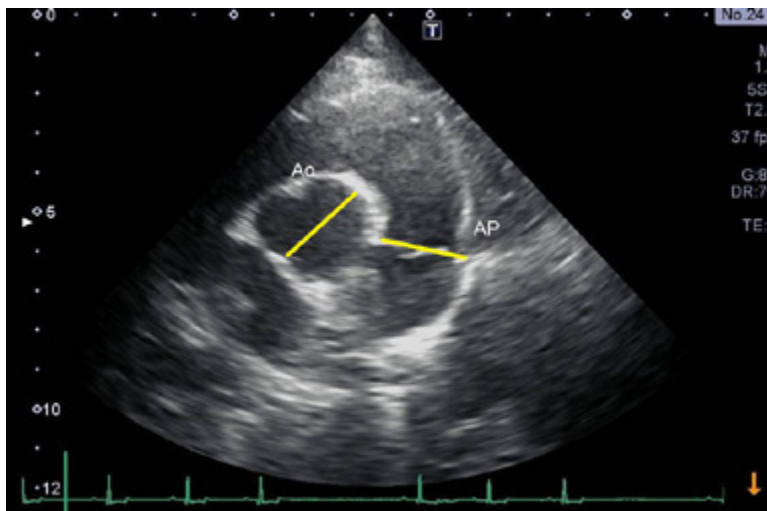


Figura 1. Corte para esternal derecho de eje corto, al inicio de la diástole. Medición del diámetro de arteria pulmonar principal (AP) y aorta (Ao), para hacer la ratio AP/Ao.

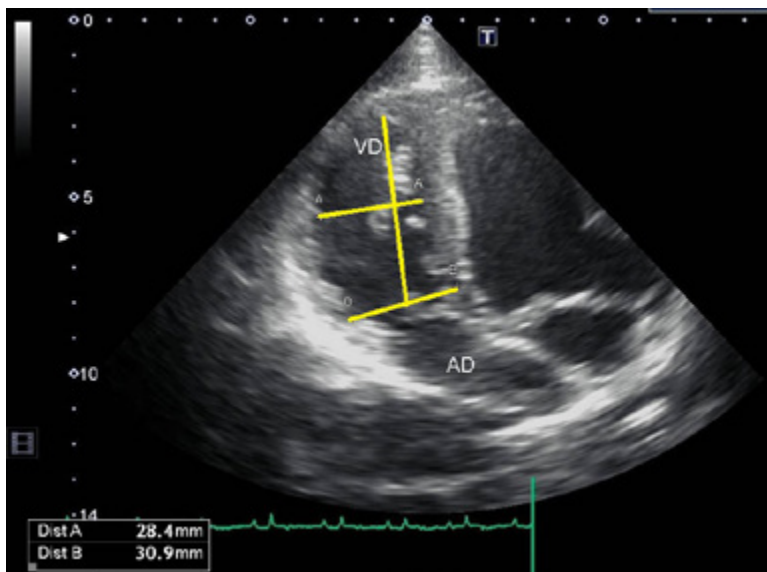


Figura 2. Corte de 4 cámaras apical izquierdo, optimizado para el ventrículo derecho. Dimensión transversal máxima del tercio basal (B) y diámetro transversal en el tercio medio a nivel de los músculos papilares (A). Perpendicular a las mismas, se traza la altura desde el anillo tricúspideo hasta el vértice.

Tracto de entrada del ventrículo derecho

Se utiliza la vista CCPI-VD durante la telediástole y se hacen dos mediciones lineales del ancho y una del largo de la cámara.

La medida de la línea basal del VD calcula la dimensión transversal máxima en el tercio basal. Mientras que la línea media del VD determina el diámetro transversal del VD en el tercio medio, aproximadamente a medio camino entre el diámetro basal máximo y el vértice, al nivel de los músculos papilares. La altura del VD se mide desde el plano del anillo tricúspideo hasta el vértice del ventrículo derecho.¹⁰ **Figura 2**

Tracto de salida del ventrículo derecho

El tracto de salida del ventrículo derecho a nivel subvalvular y los diámetros de la válvula pulmonar y de la arteria pulmonar principal se obtienen de la imagen paraesternal derecha eje corto optimizada para el tracto de salida derecho. Todas estas dimensiones se obtienen en el mismo fotograma, al inicio de la diástole, con la válvula pulmonar cerrada y las estructuras a estudiar claramente visibles.

El diámetro de la arteria pulmonar principal se mide proximal a la bifurcación, perpendicular al eje longitudinal del vaso. La medición de la válvula pulmonar se realiza entre los dos puntos de unión de las valvas a la pared del vaso. El diámetro del tracto de salida del VD subvalvular es la línea media desde la pared anterior del VD hasta la válvula aórtica.^{8,10} **Figura 3**

La ventaja de estas medidas lineales de los tractos de salida y entrada del ventrículo derecho es que son fáciles y rápidas de hacer. En un estudio de Gentile-Solomon del 2016 aparece una tabla con las medidas normales en base al peso del animal, que permiten determinar si existe, o no, una dilatación.⁸

Medidas volumétricas del VD

ATDVD (Área telediastólica del ventrículo derecho)

Esta medida se utiliza como indicador del tamaño del VD y ayuda a determinar si hay una dilatación de la cámara. Para facilitar la estanda-

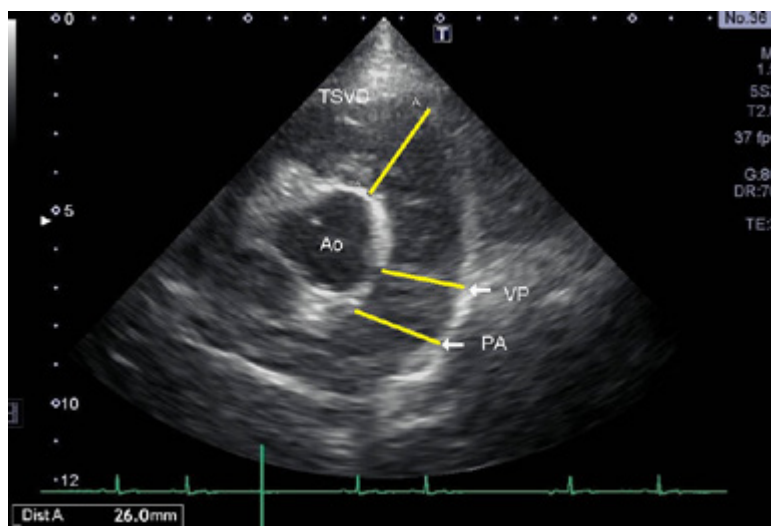


Figura 3. Corte paraesternal derecho de eje corto a nivel de la aorta. Al inicio de la diástole donde se observa la dimensión del tracto de salida del ventrículo derecho (TSVD) (Distancia A). La válvula pulmonar (VP) y de la arteria pulmonar principal (PA).

rización de la medida se puede indexar al área de superficie corporal.

El área telediastólica del ventrículo derecho se mide en la vista CCPI-VD al final de la diástole ventricular mediante planimetría. Se traza una línea, siguiendo el endocardio del VD, desde la cara lateral del anillo tricuspídeo a la cara septal, excluyendo el área del anillo valvular y las estructuras trabeculares **Figura 4 (A y B)**. El área telediastólica del ventrículo derecho (ATDVD) indexado se calcula como la relación de la ATDVD y el área de superficie corporal (BSA). El BSA se calcula como $0,101 \times \text{peso corporal (kg)}$.

El ATDVD muestra una fuerte correlación lineal positiva con BSA en perros sanos, con un rango de referencia de 94,9-10,9 cm²/m². Los estudios han demostrado que el ATDVD indexado es significativamente mayor en perros con hipertensión pulmonar moderada y severa, en comparación con perros sanos o hipertensión pulmonar leve.¹¹

FAC (Cambio de Area Fraccional-Fractional Area Change)

Las mediciones necesarias para el cálculo del cambio fraccional de área del VD se obtienen trazando las áreas telediastólica (VDA_d) e telesistólica (VDA_s) del ventrículo derecho en la

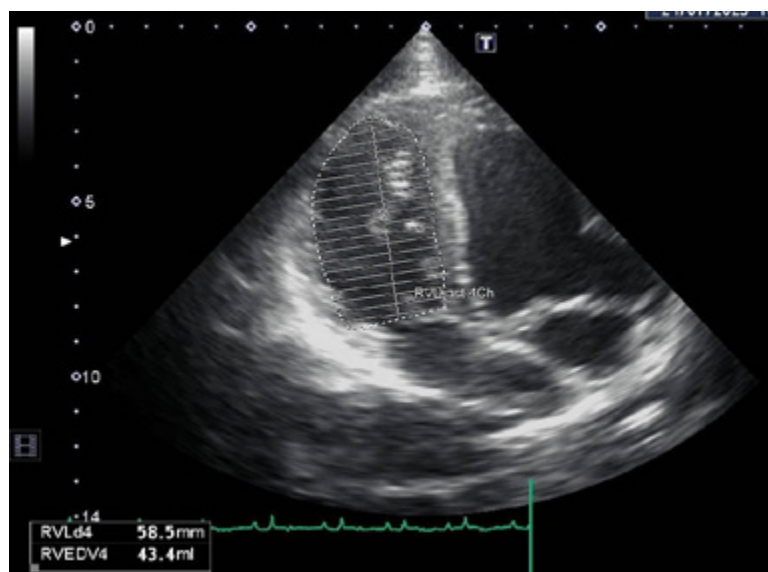


Figura 4. Corte de 4 cámaras apical izquierdo, optimizado para el ventrículo derecho. (A) Área diastólica y (B) área sistólica del VD.

vista CCPI-VD del mismo modo que en la ATDVD **Figura 4 (A y B)**. La FAC del VD se calcula mediante la fórmula: $FAC = ([VDA_d - VDA_s] / VDA_d) \times 100$. El valor obtenido en perros sanos para esta media es de 41 (± 8).⁸ Para reducir al mínimo los cambios de esta medida asociados al tamaño del animal es posible normalizarla en base al peso del paciente (FAC_n) mediante una escala alométrica, con la fórmula: $FAC_n = FAC / \text{Peso(Kg)}^{-0,097}$. La media normal de FAC_n, es de 62 (con un rango de 47.6 - 82.1).¹¹

El FAC es un índice de función sistólica global del VD, pero, a diferencia del TAPSE (Excursión Sistólica del Plano Anular Tricuspídeo), el FAC refleja tanto la contracción longitudinal como

la radial. Sin embargo, el seguimiento óptimo del borde endocárdico apical del VD puede ser complejo. Además, debido a la forma de media luna del VD y al movimiento de torsión del VI, las imágenes obtenidas del VD al final de la diástole y al final de la sístole pueden no corresponder al mismo plano.¹²

En un estudio con perros sanos a los que se les administró pimobendan y atenolol se vio que el FAC disminuía en mayor medida que otros valores en los exámenes post-atenolol, lo que sugiere que puede ser una medida muy útil para reconocer problemas de disfunción sistólica del VD.¹³

Modo M del VD

TAPSE (Excursión Sistólica del Plano Anular Tricuspídeo - Tricuspid Annular Plane Systolic Excursion)

La contracción longitudinal del VD representa la mayor parte de la función total del VD, hasta el 80 %, en comparación con el acortamiento transversal.¹⁴ El TAPSE es una medida fácil de obtener que permite evaluar esta función longitudinal del VD.

Es un índice ecocardiográfico muy adecuado para su uso en la clínica de rutina, ya que es fácil de obtener, por ser menos dependiente de la calidad de la imagen del VD y de la resolución del borde endomiocárdico, además de permitir

una evaluación de manera rápida, de la función longitudinal del VD.

Generalmente se adquiere mediante ecocardiografía en modo M, desde una vista CCPI-VD, con el cursor a nivel del anillo tricúspideo lateral, lo más paralelo posible con la pared libre del VD. Se basa en cuantificar la distancia (en milímetros) que se mueve el anillo tricúspideo en sístole. **Figura 5**

También es posible obtener esta medida utilizando solamente el B-mode. Se realiza a partir de la CCPI-VD. Se utiliza un calibrador digital para trazar una línea desde el anillo tricúspideo lateral hasta el vértice del VD al final de la diástole, coincidiendo con el cierre de la válvula tricúspide. Con esta primera línea fija en la pantalla, el video se avanza hasta el final de la sístole, inmediatamente antes de la apertura de la válvula tricúspide. Se traza una segunda línea paralela a la primera desde el mismo punto exacto del anillo tricúspideo (ahora desplazado apicalmente) hasta el punto inicial de la primera línea. Esta segunda línea cuantifica la distancia que se movió el anillo tricúspideo durante la sístole y representa el TAPSE 2D, en milímetros. **Figura 6**. Para determinar las medidas de normalidad para esta medida obtenida en 2D, Visser realizó un estudio en el 2018 donde diferenciaba el valor normal en base al peso.¹⁵

En perros, los valores obtenidos de TAPSE en modo M no son lineales con el tamaño corporal, lo que requiere que se consulten tablas de referencia o se realicen cálculos para estimar los valores de referencia.^{3,8,16,17}. Para evitar tener que utilizar tablas para determinar si el valor obtenido es normal o no, se realizó un estudio en el que se normalizó el TAPSE con el diámetro de la aorta obteniendo como valor de referencia 0,65¹⁶. En otro artículo de Tidholm et al. normalizaron el TAPSE con el peso del animal, obteniendo un valor de referencia de 0,47¹⁸.

La aplicación más común de TAPSE ha sido la evaluación de la función longitudinal del VD en el contexto de la HP. Sin embargo, los diferentes estudios demuestran que el TAPSE no se ven afectado exclusivamente por la HP y que disminuye en perros con disfunción sistólica primaria del VD asociada a otras patologías¹⁶.

Una de las limitaciones del TAPSE es que parte de la suposición de que el desplazamiento de un solo segmento representa la función de

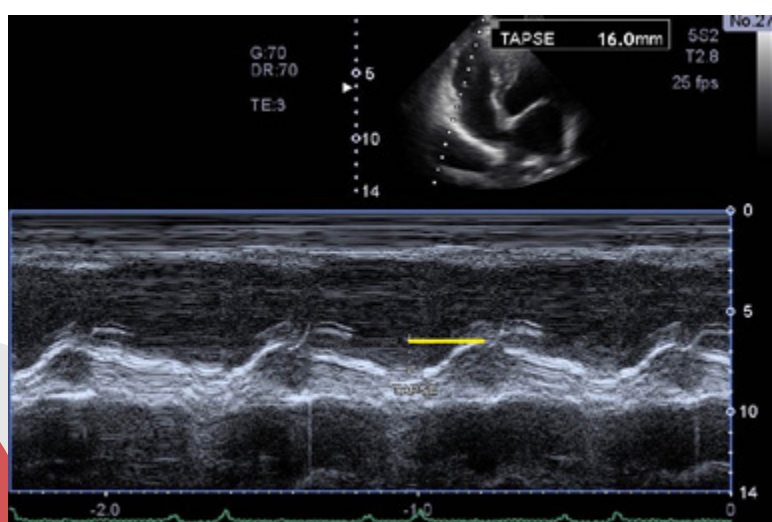


Figura 5. TAPSE en Modo M: el cursor se alinea desde el vértice del VD hasta el anillo tricúspideo lateral y se cuantifica la distancia máxima del movimiento del anillo tricúspideo durante la sístole. (línea vertical).

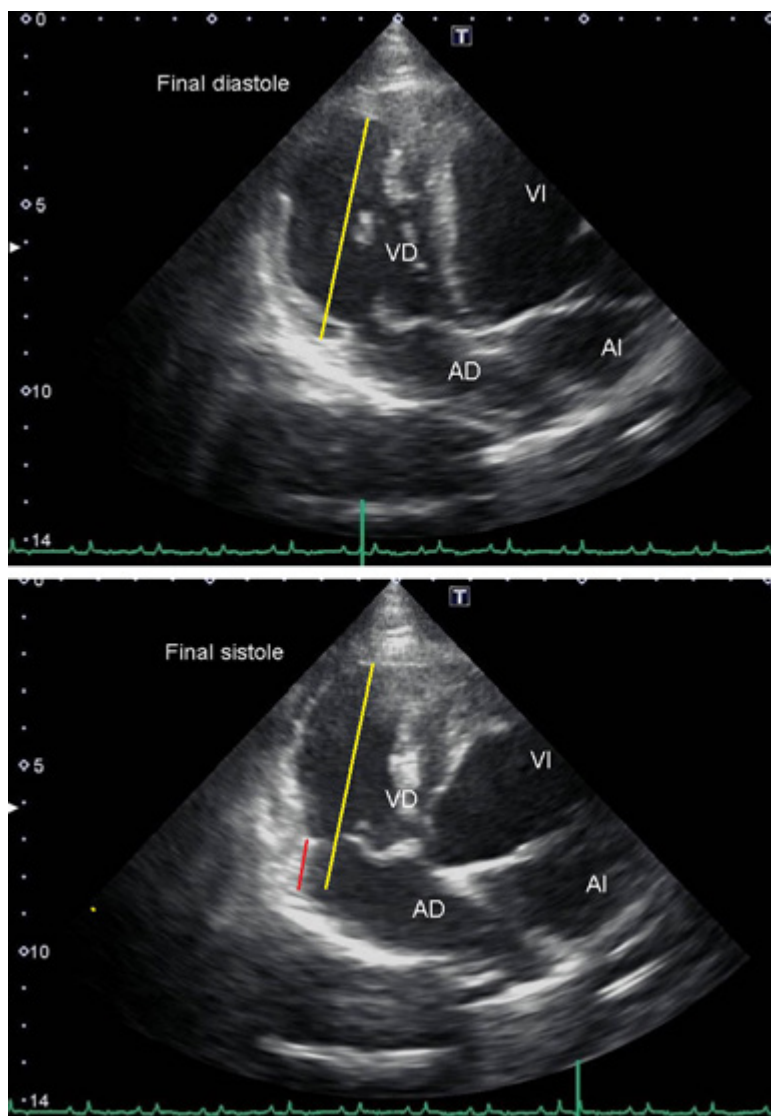


Figura 6. TAPSE 2D: Corte de cuatro cámaras apical izquierdo, optimizado para el VD. Se dibuja una línea (línea amarilla) desde el anillo tricúspideo lateral hasta al vértice del VD, al final de la diástole (inmediatamente después del cierre de la válvula tricúspide) y después se avanza el video hasta el final de la sístole (inmediatamente antes de la apertura de la válvula tricúspide), sin borrar la línea ya medida (línea amarilla). Después se mide la distancia desde el punto actual del anillo tricúspideo hasta el punto original donde estaba el anillo (línea roja).
Ventrículo derecho (VD); Atrio derecho (AD); Ventrículo izquierdo (VI); Atrio izquierdo (AI).

todo el VD, por lo que no se tiene en cuenta las posibles disfunciones regionales, en particular las que afectan al septo. Es también una medida muy dependiente del ángulo de la línea de modo M, durante la adquisición del valor y de la poscarga, lo que provoca que se puedan encontrar valores fuera de la normalidad no asociados a un problema intrínseco del

miocardio ventricular. Otro límite del TAPSE es que supone que todo el movimiento del anillo tricúspideo anterolateral depende del acortamiento longitudinal del VD. Esto no tiene en cuenta el movimiento cardíaco no relacionado con el VD, como el movimiento dependiente de la contracción del VI, el movimiento de traslación cardíaco en los derrames pericárdicos o el movimiento respiratorio del paciente durante la adquisición de imágenes.¹²

RVOT-FS

(Acortamiento Fraccional del Tracto Salida del VD - Right Ventricular Outflow Tract Fractional Shortening)

El RVOT-FS se realiza mediante modo M en la imagen eje corto paraesternal derecho, optimizada para el tracto de salida del ventrículo derecho con la aorta en corte transversa, utilizando la técnica *inner Edge to inner Edge*. La línea del modo M se coloca perpendicular al tracto de salida del VD y paralelo a la comisura de la válvula aórtica entre las valvas no coronaria y coronaria izquierda. **Figura 7**

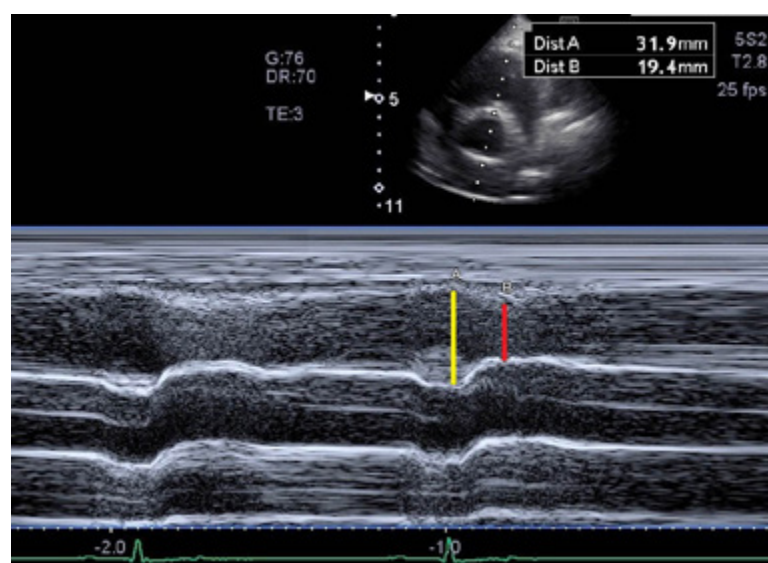


Figura 7. Acortamiento fraccional del tracto de salida del ventrículo derecho (TSVD). Se obtiene un modo M desde el corte paraesternal derecho de eje corto, a nivel de la raíz aórtica, a nivel del tracto de salida del ventrículo derecho (TSVD) y paralelo a la comisura de la válvula aórtica entre la cúspide no coronaria y la coronaria izquierda. Al final de la diástole (línea amarilla) y al final de la sístole (línea roja).
Acortamiento fraccional TSVD = $\frac{\text{dimensión final diástole} - \text{dimensión final sístole}}{\text{dimensión final diástole}}$

La fórmula del RVOT-FS es: $([RVOT_{ED} - RVOT_{ES}] / RVOT_{ED}) \times 100$, donde $RVOT_{ED}$ es la dimensión del tracto de salida del VD al final de la diástole y $RVOT_{ES}$ es la dimensión del tracto de salida del VD al final de la sístole.

Los perros sanos presentan un RVOT-FS > 44 %. Es un índice de la función sistólica del VD que se obtiene fácilmente y que tiende a disminuir en casos de empeoramiento de la HP.¹⁹

Atrio Derecho

Dimensiones Lineales y Medidas Volumétricas

Las dimensiones lineales y las áreas del atrio derecho (AD) se obtienen tanto del eje largo paraesternal derecho (ELPD), como en la imagen CCPI-VD. Para la medición del atrio derecho en el ELPD es necesario modificar la vista para que la imagen se "incline" y el AD pueda verse en su totalidad. Para ello es necesario mover la sonda hacia el esternón mientras se dirige el plano de la imagen cranealmente. Todas las dimensiones y áreas se obtienen al final de la sístole ventricular, en el fotograma anterior a la apertura de la válvula tricúspide.

Se realizan dos dimensiones lineales que cortan el centro del AD. La dimensión menor (AD-men) es paralela al plano del anillo tricuspídeo y la dimensión mayor (AD-may) es perpendicular. El área telesistólica del AD (AAD) se obtiene mediante planimetría. Estas medidas pueden realizarse en ELPD y en CCPI-VD pero los resultados obtenidos no son intercambiables, existiendo valores de referencia distintos en base al corte utilizado. En el artículo de Gentile-Solomon et al. del 2016 es posible encontrar los valores de normalidad de estas medidas divididos por el peso del paciente.⁸ **Figuras 8 y 9**

Para reducir las variaciones asociadas al peso, es posible indexar el AAD (medida en la imagen CCPI-VD) a la BSA. El AAD-index se calcula como AAD dividida por la BSA. El valor normal de AAD-index, medido en cm^2/m^2 , es de 7.3 (4.2-10.2). En un estudio realizado con perros con hipertensión pulmonar se observó que, del mismo modo que sucede en medicina humana, el agrandamiento del AD en perros es frecuente en casos de hipertensión pulmonar moderada o grave y que valores de AAD-index >12,3 cm^2/m^2 se asocian a un riesgo alto de fallo cardiaco derecho.²⁰

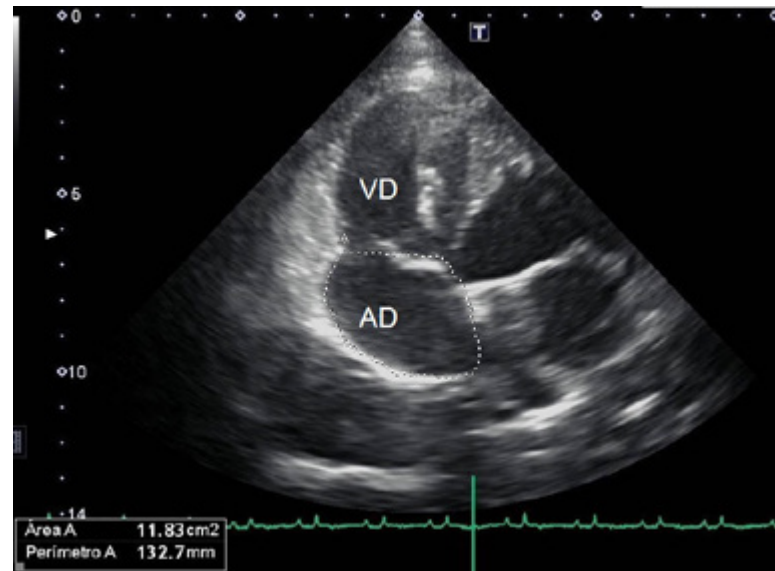


Figura 8. Corte de 4 cámaras apical izquierdo, optimizado para el ventrículo derecho. Se mide la planimetría del atrio derecho al final de la sístole ventricular.

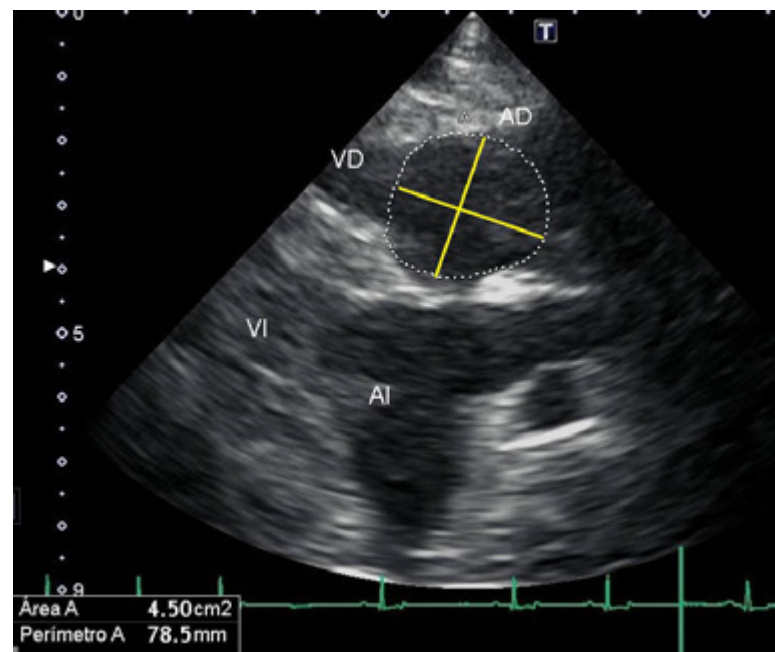


Figura 9. Corte paraesternal derecho de eje largo, optimizado para visualizar el atrio derecho. Medición de la dimensión mayor y la dimensión menor del atrio derecho.

Modo M: RPAD Index

(Índice de Distensibilidad de la Arteria Pulmonar Derecha - Right Pulmonary Artery Distensibility Index)

Para realizar esta medida los pacientes deben colocarse en decúbito lateral derecho; el transductor se coloca en el tercer espacio intercostal y el haz de sonido se dirige caudal y dorsalmente. Es necesario obtener una vista clara tanto de la aurícula izquierda como de la vena pulmonar en la vista de cuatro cámaras del eje largo.

Figura 10 A

Una vez la imagen bidimensional es óptima se realiza un modo M de la arteria pulmonar derecha, con la velocidad de barrido más rápida posible pero lo suficientemente lenta como para mostrar tres ciclos en la misma imagen. La dimensión sistólica de la arteria pulmonar se mide en el diámetro máximo (normalmente a la altura de la onda T) y el diámetro diastólico en su dimensión más pequeña (en la onda Q), utilizando la técnica *inner Edge to inner Edge*. El índice RPAD se calcula siguiendo la siguiente fórmula: [diámetro sistólico - diámetro diastólico] / dividido por el diámetro sistólico. Los valores de referencia para perros sanos se encuentran entre el 42 y el 45 %, un estudio realizado por Venco et al. en 2014 demostró una fuerte relación entre la HP y el RPAD, el cual disminuía con el empeoramiento de la HP.²¹

Figura 10 B

Estudio Doppler

Regurgitación tricúspide

Valorar la velocidad de regurgitación de la tricúspide (RT), es un buen indicador de la presión en el VD en ausencia de estenosis pulmonar y/o tricúspidea. Es cierto que valorar la presión del VD por ecocardiografía no es tan preciso como hacerlo con cateterismo, pero también es cierto que es así como lo hacemos en nuestra práctica diaria, ya que es más rápido y evita una anestesia general al paciente.

Para estimar la presión en el VD se valora la RT, en el corte paraesternal izquierdo de 4 cámaras, optimizada para el tracto de entrada del VD. Hay que alinear bien el Doppler, con una frecuencia de sonda lo menor posible y con la ganancia co-

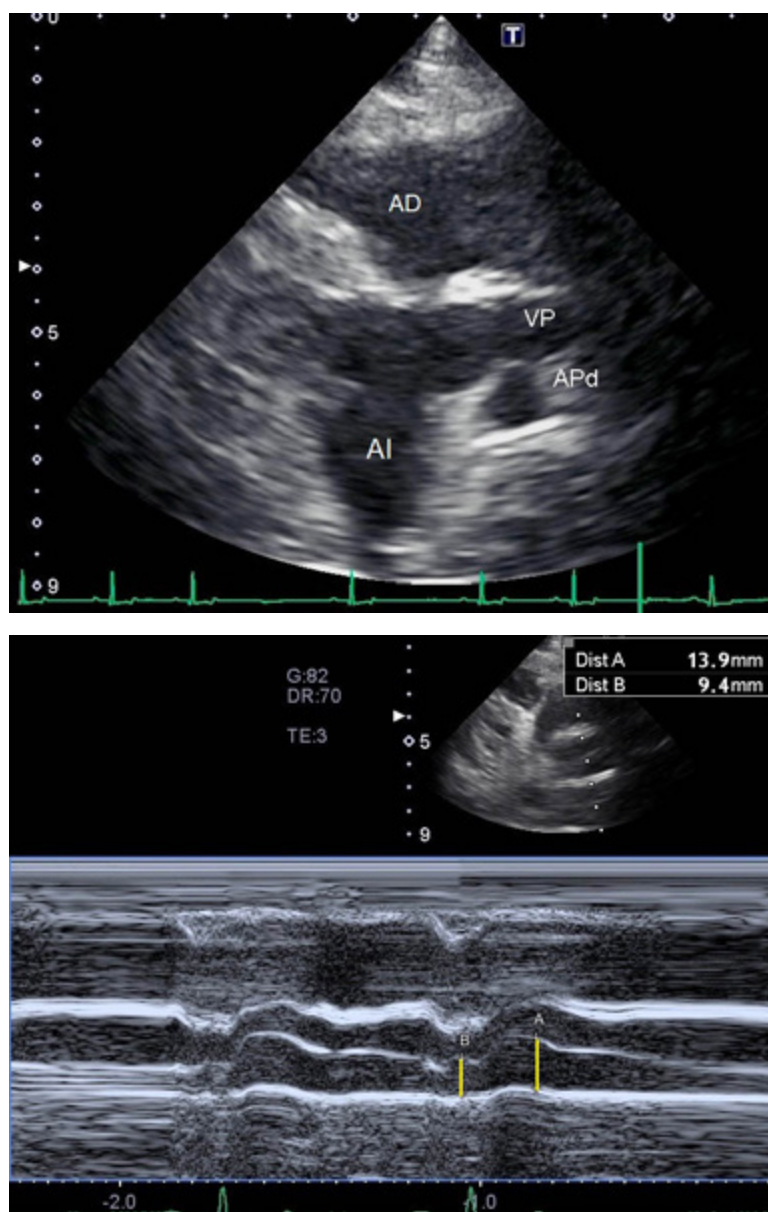


Figura 10. Índice de distensibilidad de la arteria pulmonar derecha.

10 A. Corte paraesternal derecho de eje largo de 4 cámaras. Vista del atrio izquierdo, justo en la entrada de la vena pulmonar (longitudinal) y la arteria pulmonar derecha (trasversal). Se hace corte en modo M para para comparar vena con arteria.

10 B. Modo M. La medida sistólica se mide en el diámetro máximo (A) y la diastólica en el diámetro mínimo (generalmente en la onda Q) (B).

recta, para no subestimar, ni sobreestimar (no medir las barbas de la curva). **Figura 11**

El gradiente de presión Doppler (GPD) transtricúspideo (mmHg) se estima usando la velocidad del pico sistólico de la RT (m/seg) en la ecuación de Bernoulli modificada: $GPD (p_1 - p_2) = 4 (V)^2$.

En el consenso ACVIM de 2020 para la hipertensión pulmonar se considera que un paciente

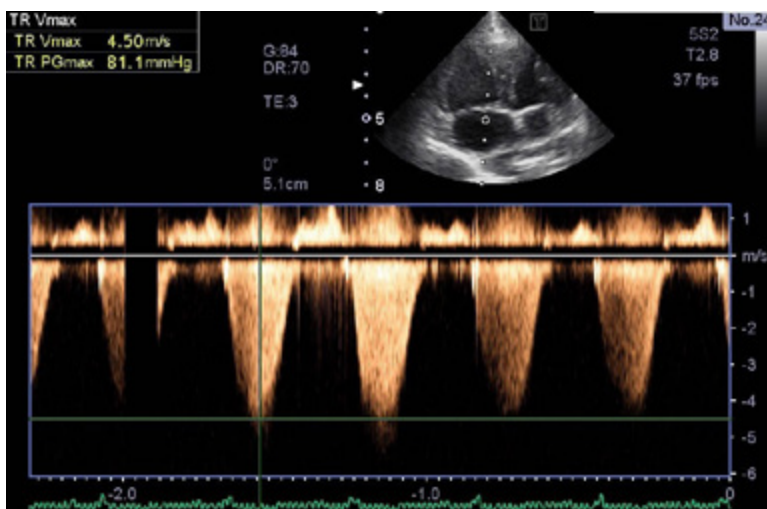


Figura 11. Corte de 4 cámaras apical izquierdo, optimizado para el ventrículo derecho. Imagen Doppler espectral de la insuficiencia de la tricúspide. Pico de velocidad sistólica de la regurgitación tricúspidea.

con una velocidad de regurgitación menor o igual a 3m/s (en ausencia de otros signos relacionados con la HP) tiene un riesgo bajo de sufrir dicho problema.²²

Intervalos de tiempo sistólico del ventrículo derecho

Los tiempos de intervalos sistólicos del VD incluyen el tiempo de aceleración (TA), el tiempo de eyección (TE), la ratio entre ambos TA/TE y el periodo de preeyección (PPE), todo calculado desde flujo Doppler de velocidad de salida de el tronco pulmonar. de salida. **Figura 12**

Un estudio realizado por Serres et al. con más de 100 perros con y sin hipertensión pulmonar demostró que en perros sanos los valores de TA eran 93 ± 16 ms y que un valor menor de 0,56 de TA/TE estaba asociado a HP⁹. El valor normal de TE se encuentra entre 174 y 194 milisegundos y el de PPE se halla entre 42 y 59 milisegundos, dependiendo del peso del animal.²³

Índice del rendimiento miocárdico del ventrículo derecho, índice Tei

El índice de rendimiento miocárdico del VD, o también llamado índice Tei, es un indicador de la funcionalidad global del VD, tanto de la función sistólica, como de la diastólica. Se define como

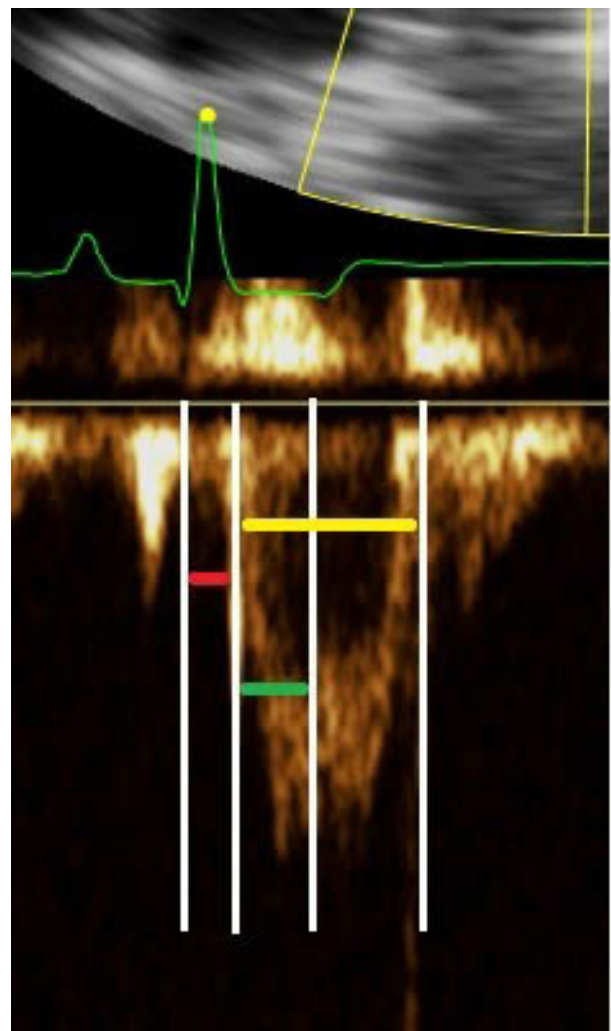


Figura 12. Intervalos de tiempos sistólicos del ventrículo derecho obtenido desde el perfil de la velocidad de salida del ventrículo derecho. PPE. periodo de pre-eyección (línea roja), TA tiempo de aceleración (línea verde), TE tiempo de eyección (línea amarilla).

la relación del tiempo isovolumétrico total (tiempo de relajación isovolumétrico (IVRT) + tiempo de contracción isovolumétrico (IVCT)), dividido por el tiempo de eyección total (ET), mediante la fórmula: $IVRT + IVCT/ET$. **Figura 13**

Cuando el valor es elevado se asocia a disfunción del VD, ya que la disfunción sistólica prolonga el tiempo de contracción isovolumétrico y la disfunción diastólica prolonga el tiempo de relajación isovolumétrico.

Sirve como valor predictivo en pacientes con hipertensión pulmonar, cardiopatías congénitas, infarto del VD y miocardiopatía hipertrófica^{24,25}. También se ha publicado que tiene valor pronóstico en perros con degeneración enfermedad de la válvula mitral²⁶.

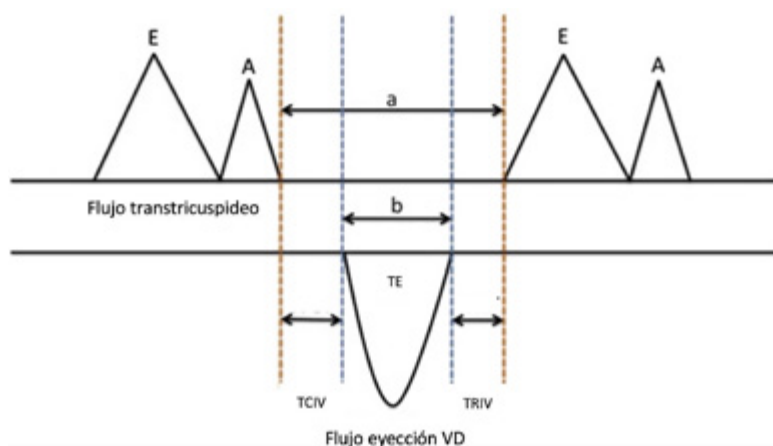


Figura 13. Representación esquemática del Doppler pulsado del flujo transtricuspideo de entrada y el flujo de salida del ventrículo derecho, para calcular el índice Tei. Índice Tei = $TCIV + TRIV / TE = a / b$.

Tiempo de eyección (TE), Tiempo de contracción isovolumétrica (TCIV), Tiempo de relajación isovolumétrica (TRIV). "a" representa el intervalo entre el cese y el inicio del flujo de entrada transtricuspideo y "b" representa la eyección de flujo por el VD. E, velocidad pico durante el inicio de la diástole; A, velocidad pico de la contracción auricular.

El límite superior de referencia para el índice Tei es 0,40 con Doppler pulsado y 0,55 con Doppler tisular. Es fácil de realizar, no requiere imágenes de alta calidad, ni se ve afectado por la geometría del VD, aunque no se utiliza si los latidos son irregulares o cuando la presión en el atrio derecho es elevada.^{23,27,28}

Muchas veces los tiempos isovolumetricos del VD son muy breves o incluso inexistentes, y puede haber una disminución de la relajación isovolumétrica secundaria a un aumento de la presión en la aurícula derecha, por lo tanto, es un índice muy sensible a condiciones de carga²⁹.

Estudio Doppler de la función del VD

El cambio de presiones en el VD respecto al tiempo, (dP/dt) se puede considerar como un índice de contractilidad ventricular o función sistólica. El dP/dt del VD se calcula midiendo el tiempo necesario para que el jet de regurgitación de la tricúspide aumente su velocidad de 1 a 2 m/s³⁰.

Utilizando la fórmula simplificada de Bernoulli, esto equivale a un aumento de presión de 4 a 16 mmHg con una diferencia de 12 mmHg. Por

lo tanto, dP/dt se calcula dividiendo 12 mmHg por tiempo en segundos. No obstante, depende mucho de la carga, es poco preciso en pacientes con IT grave y faltan estudios en pacientes normales, así que no es muy recomendado en la práctica diaria⁶.

Doppler tisular (DT) - velocidad miocárdica sistólica máxima en el lateral del anulus tricuspideo

Es similar al TAPSE y proporciona una evaluación específica de la función sistólica longitudinal del VD y también permite cuantificar las velocidades diastólicas.

El DT pulsado del movimiento miocárdico longitudinal del lateral del anulus tricuspideo, nos da la velocidad del pico sistólico anular (S') **Figura 14**. Para obtener una buena imagen debemos alinear el cursor tan paralelo como sea posible al plano longitudinal de la pared libre del VD, con un *frame rate* de al menos 125 *frame/s*. Las mediciones de S' se realiza con una velocidad de barrido de al menos 66 mm/s, con volúmenes de muestra de 1 a 4 mm¹³.

Las imágenes de Doppler tisular pulsado y color no son intercambiables. Las velocidades de Doppler tisular color representan la media del espectro de velocidad y son más bajas en comparación con el TD pulsado.

Como todas las imágenes basadas en TD, S' debe hacerse con un *frame rate* alto y va a depender del ángulo, de la calidad de imagen 2D y se verá afectado negativamente por el movimiento de

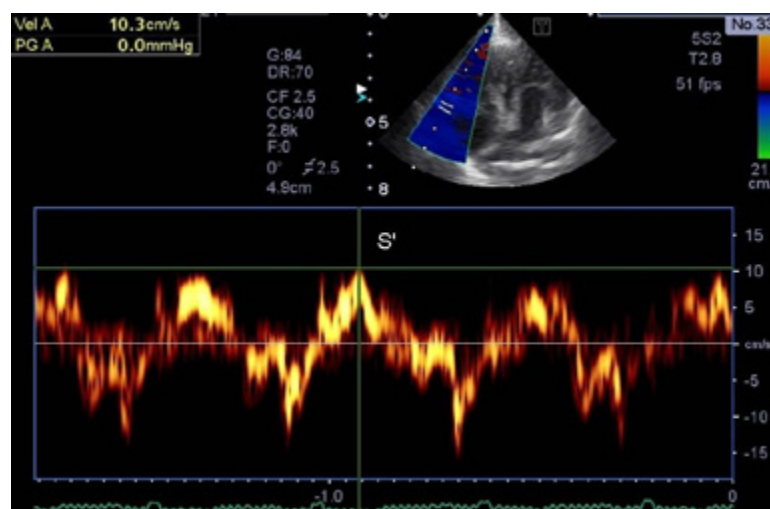


Figura 14. Doppler tisular pulsado del movimiento miocárdico longitudinal del lateral del anillo tricuspideo, con la velocidad del pico sistólico anular S'.

traslación. Tanto el Doppler tisular pulsado S' , como el color son fáciles de reproducir, repetir y existen intervalos de referencia en perros^{13,31}.

Un VD $S' < 11,5$ cm/s se correlaciona con una fracción de eyección del VD < 45 % (sensibilidad del 90 %, especificidad del 85 %) y un VD $S' < 10$ cm/s debe hacer sospechar una disfunción del VD, sobretodo en adultos jóvenes⁶. Hay un estudio publicado donde el DT S' normalizado al peso ≥ 5.6 cm/s/kg se considera normal¹⁷.

A nivel clínico, el Doppler tisular pulsado S' tiene valor diagnóstico en perros con hipertensión pulmonar⁹ y valor predictivo en cardiomiopatía dilatada³².

Strain longitudinal y strain rate del ventrículo derecho

Strain (S) representa la deformación del tejido (cambio porcentual en la longitud de tejido en comparación con su longitud original) y la velocidad de deformación, el *strain rate* (SR), representa la velocidad a la que esto ocurre en el tiempo. Ambos índices proporcionan información adicional sobre la función miocárdica, independiente de la velocidad miocárdica. Tampoco es dependiente del ángulo (como lo es el TD).

Se puede valorar a través de la ecocardiografía Doppler con dos técnicas distintas, la ecocardiografía por rastreo del moteado - *speckle tracking* (STE) o por Doppler tisular en color, en plano longitudinal, radial y circunferencial^{33,34}. El *speckle tracking* es menos dependiente del ángulo, por lo tanto, más fiable y con menor variabilidad intra e interoperator. Se considera un valor con buena repetitividad, aunque en un estudio se vio que puede estar afectando por el peso corporal, la frecuencia cardíaca y la edad, por lo tanto, su interpretación debe hacerse con precaución³⁵.

El *speckle tracking* es capaz de detectar pequeñas diferencias en la textura o moteado de cada segmento miocardio, como si habláramos de una "huella digital" de cada segmento. Una vez detectada la "huella digital" se la puede rastrear y medir en múltiples momentos del ciclo cardíaco y calcular su estiramiento o retracción (deformación) a partir de un punto inicial.

El *strain* longitudinal (SL) y SR de la pared libre del VD se obtienen desde el corte apical izquierdo de 4 cámaras optimizado para el VD. El valor de *strain* se expresa en porcentaje de cambio de tamaño y puede ser positivo, si el desplazamiento se acerca (alargamiento o engrosamiento del miocardio) o negativo si se aleja (acortamiento o adelgazamiento del miocardio). Se calcula el *strain* longitudinal, ya que el eje longitudinal es el que refleja mejor la contracción global del VD. Su valoración es a nivel de la capa subendocárdica, mejor que subepicárdica, ya que se visualiza mejor, la determinación es más precisa y, además, es la capa que contribuye a un 80 % a la contracción del VD¹⁷.

Para calcular la deformación, se requieren velocidades altas y ajustar un sector de imagen estrecho que se centre en la pared del VD. El SL global del VD se define como la tensión promedio en la pared libre del VD y el tabique interventricular. En un estudio reciente, los valores de corte de la SL sistólico en la pared libre VD son de -20.8 % y de 18.3 % para el SL global¹⁷. En perros, se ha publicado resultados similares con anterioridad^{13,35} y son comparables con estudios publicados en humana.³⁶

Las ventajas tanto del S como del SR son la capacidad de evaluación funcional global y regional del VD, no obstante, su aplicación clínica actual es cuestionable ya que son índices que requieren un post procesado que hace que su análisis sea lento y requieren buenas imágenes 2D, no aplicable en pacientes con mala ventana apical. También hay que tener en cuenta que tanto el SL como el SRL se ven afectados en situaciones donde hay sobrecargas de volumen derecho, donde la interpretación debe hacerse con cuidado.³⁷

Valoración del VD en 3D

El uso de métodos tridimensionales (3D) brinda la oportunidad de tener mayor precisión de las medidas volumétricas al mostrar el ventrículo derecho en muchos planos, permitiendo calcular el volumen del VD independientemente de las suposiciones del modelo de la geometría ventricular.

Las imágenes se adquieren desde la proyección apical 4 cámaras optimizada para el VD, y tiene

la ventaja de poder calcular el volumen del VD, aunque no se tenga una buena resolución de la imagen. Deben analizarse 4 latidos consecutivos y a partir de aquí el propio programa calcula el EDV, ESV, SV and EF. Una de las limitaciones es que es necesario una elaboración de la imagen y una corrección manual de bordes que requiere mucho tiempo.³⁸

Un estudio realizado por Feldhütter et al. con más de 200 perros determinó los valores normales (diferenciados por peso) de los volúmenes telediastólicos y telesistólicos del VD normales adquiridos mediante imágenes 3D.¹⁷

Bibliografía

1. 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.
2. Lorenz CH, Walker ES, Morgan VL, Klein SS, Graham TP, Jr. Normal human right and left ventricular mass, systolic function, and gender differences by cine magnetic resonance imaging. *J Cardiovasc Magn Reson*. 1999;1(1):7-21.
3. Visser LC. Right Ventricular Function: Imaging Techniques. *Vet Clin North Am Small Anim Pract*. 2017;47(5):989-1003.
4. Haddad F, Doyle R, Murphy DJ, Hunt SA. Right ventricular function in cardiovascular disease, part II: pathophysiology, clinical importance, and management of right ventricular failure. *Circulation*. 2008;117(13):1717-31.
5. Dell'Italia LJ, Walsh RA. Acute determinants of the hang-out interval in the pulmonary circulation. *Am Heart J*. 1988;116(5 Pt 1):1289-97.
6. 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; quiz 86-8.
7. Starling MR, Walsh RA, Dell'Italia LJ, Mancini GB, Lasher JC, Lancaster JL. The relationship of various measures of end-systole to left ventricular maximum time-varying elastance in man. *Circulation*. 1987;76(1):32-43.
8. Gentile-Solomon JM, Abbott JA. Conventional echocardiographic assessment of the canine right heart: reference intervals and repeatability. *J Vet Cardiol*. 2016;18(3):234-47.
9. Serres F, Chetboul V, Gouni V, Tissier R, Sampedrano CC, Pouchelon JL. Diagnostic value of echo-Doppler and tissue Doppler imaging in dogs with pulmonary arterial hypertension. *J Vet Intern Med*. 2007;21(6):1280-9.
10. 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.
11. Vezzosi T, Domenech O, Costa G, Marchesotti F, Venco L, Zini E, et al. Echocardiographic evaluation of the right ventricular dimension and systolic function in dogs with pulmonary hypertension. *J Vet Intern Med*. 2018;32(5):1541-8.
12. Chetboul V, Damoiseaux C, Lefebvre HP, Concordet D, Desquilbet L, Gouni V, et al. Quantitative assessment of systolic and diastolic right ventricular function by echocardiography and speckle-tracking imaging: a prospective study in 104 dogs. *J Vet Sci*. 2018;19(5):683-92.
13. Visser LC, Scansen BA, Brown NV, Schober KE, Bonagura JD. Echocardiographic assessment of right ventricular systolic function in conscious healthy dogs following a single dose of pimobendan versus atenolol. *J Vet Cardiol*. 2015;17(3):161-72.
14. Aloia E, Cameli M, D'Ascenzi F, Sciacaluga C, Mondillo S. TAPSE: An old but useful tool in different diseases. *Int J Cardiol*. 2016;225:177-83.
15. Visser LC, Sintov DJ, Oldach MS. Evaluation of tricuspid annular plane systolic excursion measured by two-dimensional echocardiography in healthy dogs: repeatability, reference intervals, and comparison with M-mode assessment. *J Vet Cardiol*. 2018;20(3):165-74.
16. Caivano D, Dickson D, Pariaut R, Stillman M, Rishniw M. Tricuspid annular plane systolic excursion-to-aortic ratio provides a bodyweight-independent measure of right ventricular systolic function in dogs. *J Vet Cardiol*. 2018;20(2):79-91.
17. Feldhütter EK, Domenech O, Vezzosi T, Tognetti R, Sauter N, Bauer A, et al. Echocardiographic reference intervals for right ventricular indices, including 3-dimensional volume and 2-dimensional strain measurements in healthy dogs. *J Vet Intern Med*. 2022;36(1):8-19.
18. Tidholm A, Hoglund K, Haggstrom J, Ljungvall I. Diagnostic Value of Selected Echocardiographic Variables to Identify Pulmonary Hypertension in Dogs with Myxomatous Mitral Valve Disease. *J Vet Intern Med*. 2015;29(6):1510-7.
19. Caivano D, Rishniw M, Biretoni F, Patata V, Giorgi ME, Dei K, et al. Right ventricular outflow tract fractional shortening: an echocardiographic index of right ventricular systolic function in dogs with pulmonary hypertension. *J Vet Cardiol*. 2018;20(5):354-63.
20. Vezzosi T, Domenech O, Iacona M, Marchesotti F, Zini E, Venco L, et al. Echocardiographic Evaluation of the Right Atrial Area Index in Dogs with Pulmonary Hypertension. *J Vet Intern Med*. 2018;32(1):42-7.
21. Venco L, Mihaylova L, Boon JA. Right Pulmonary Artery Distensibility Index (RPAD Index). A field study of an echocardiographic method to detect early development of pulmonary hypertension and its severity even in the absence of regurgitant jets for Doppler evaluation in heartworm-infected dogs. *Vet Parasitol*. 2014;206(1-2):60-6.

22. Reinero C, Visser LC, Kellihan HB, Masseau I, Rozanski E, Clercx C, et al. ACVIM consensus statement guidelines for the diagnosis, classification, treatment, and monitoring of pulmonary hypertension in dogs. *J Vet Intern Med.* 2020.
23. Baumwart RD, Meurs KM, Bonagura JD. Tei index of myocardial performance applied to the right ventricle in normal dogs. *J Vet Intern Med.* 2005;19(6):828-32.
24. Eidem BW, O'Leary PW, Tei C, Seward JB. Usefulness of the myocardial performance index for assessing right ventricular function in congenital heart disease. *Am J Cardiol.* 2000;86(6):654-8.
25. Morner S, Lindqvist P, Waldenstrom A, Kazzam E. Right ventricular dysfunction in hypertrophic cardiomyopathy as evidenced by the myocardial performance index. *Int J Cardiol.* 2008;124(1):57-63.
26. Nakamura K, Morita T, Osuga T, Morishita K, Sasaki N, Ohta H, et al. Prognostic Value of Right Ventricular Tei Index in Dogs with Myxomatous Mitral Valvular Heart Disease. *J Vet Intern Med.* 2016;30(1):69-75.
27. Teshima K, Asano K, Iwanaga K, Koie H, Uechi M, Kato Y, et al. Evaluation of right ventricular Tei index (index of myocardial performance) in healthy dogs and dogs with tricuspid regurgitation. *J Vet Med Sci.* 2006;68(12):1307-13.
28. Morita T, Nakamura K, Osuga T, Lim SY, Yokoyama N, Morishita K, et al. Repeatability and reproducibility of right ventricular Tei index valves derived from three echocardiographic methods for evaluation of cardiac function in dogs. *Am J Vet Res.* 2016;77(7):715-20.
29. Jurcut R, Giusca S, La Gerche A, Vasile S, Ghingina C, Voigt JU. The echocardiographic assessment of the right ventricle: what to do in 2010? *Eur J Echocardiogr.* 2010;11(2):81-96.
30. Anconina J, Danchin N, Selton-Suty C, Isaaz K, Juilliere Y, Buffet P, et al. Noninvasive estimation of right ventricular dP/dt in patients with tricuspid valve regurgitation. *Am J Cardiol.* 1993;71(16):1495-7.
31. Chetboul V, Sampedrano CC, Gouni V, Concordet D, Lamour T, Ginesta J, et al. Quantitative assessment of regional right ventricular myocardial velocities in awake dogs by Doppler tissue imaging: repeatability, reproducibility, effect of body weight and breed, and comparison with left ventricular myocardial velocities. *J Vet Intern Med.* 2005;19(6):837-44.
32. Chetboul V, Gouni V, Sampedrano CC, Tissier R, Serres F, Pouchelon JL. Assessment of regional systolic and diastolic myocardial function using tissue Doppler and strain imaging in dogs with dilated cardiomyopathy. *J Vet Intern Med.* 2007;21(4):719-30.
33. Chetboul V. Advanced techniques in echocardiography in small animals. *Vet Clin North Am Small Anim Pract.* 2010;40(4):529-43.
34. Locatelli C, Spalla I, Zanaboni AM, Brambilla PG, Bussadori C. Assessment of right ventricular function by feature-tracking echocardiography in conscious healthy dogs. *Res Vet Sci.* 2016;105:103-10.
35. Morita T, Nakamura K, Osuga T, Yokoyama N, Khoirun N, Morishita K, et al. The repeatability and characteristics of right ventricular longitudinal strain imaging by speckle-tracking echocardiography in healthy dogs. *J Vet Cardiol.* 2017;19(4):351-62.
36. Vitarelli A, Conde Y, Cimino E, Stellato S, D'Orazio S, D'Angeli I, et al. Assessment of right ventricular function by strain rate imaging in chronic obstructive pulmonary disease. *Eur Respir J.* 2006;27(2):268-75.
37. Morita T, Nakamura K, Osuga T, Yokoyama N, Morishita K, Sasaki N, et al. Effect of acute volume overload on echocardiographic indices of right ventricular function and dyssynchrony assessed by use of speckle tracking echocardiography in healthy dogs. *Am J Vet Res.* 2019;80(1):51-60.
38. Sieslack AK, Dziallas P, Nolte I, Wefstaedt P, Hungerbuhler SO. Quantification of right ventricular volume in dogs: a comparative study between three-dimensional echocardiography and computed tomography with the reference method magnetic resonance imaging. *BMC Vet Res.* 2014;10:242.