

4D-*FLOW* EN RM DE CORAZÓN: TÉCNICA, ANÁLISIS Y APLICACIONES CLÍNICAS

Manuel López Herrero¹, María Vidal Martínez¹, Rosa Teresa Agüero Otayza², José Juan Gómez de Diego³, Paula Hernández Mateo¹, María Paola Moncayo Hinojosa¹, Álvaro Rueda de Eusebio¹ y Ana Bustos García de Castro¹.

¹**Servicio de Radiodiagnóstico, Hospital Clínico San Carlos, Madrid.**

²Servicio de Radiodiagnóstico, Hospital Nacional Sergio E. Bernales, Perú.

³Servicio de Cardiología, Hospital Clínico San Carlos, Madrid.

OBJETIVO DOCENTE

- La obtención de imágenes por contraste de fase (PC) forma parte del protocolo habitual de una RM cardiaca para valorar el flujo sanguíneo.
 - **4D-Flow** es una extensión de esta técnica; se trata de una **secuencia cine volumétrica e isotrópica** que sirve para codificar la **velocidad tridimensional de los espines durante todo el ciclo cardíaco**. Por tanto, permite evaluar de formas **cualitativa y cuantitativa** diversos aspectos hemodinámicos.
 - Conocer sus **principios técnicos y cómo interpretarla** es importante para analizar los flujos sanguíneos, en orden de comprender la fisiopatología de las distintas enfermedades cardiovasculares. Además, se revisan sus **indicaciones actuales y potenciales** futuras.
-

TÉCNICA

- La **resolución espacial** debe ser **buena**, pero cuanto más pequeño es el vóxel, disminuye la relación señal-ruido y mayor es el tiempo de adquisición. Para estudios cardiacos se usan **vóxeles** de **2,5-3 mm**.
 - La **resolución temporal** conviene ser alta, de aprox. unos **40 ms** para detectar fenómenos hemodinámicos de corta duración.
 - El rango de velocidades de flujo que se desea visualizar debe definirse previamente con la **VENC** (*velocity encoding sensitivity*).
-

TÉCNICA: VENC

- La **VENC** (*velocity encoding sensitivity*) determina la **velocidad máxima de flujo que puede ser registrada**.
 - Si se supera, aparece *aliasing* y no puede cuantificarse, pero si se usa una VENC demasiado alta existe riesgo de obtener imágenes demasiado **ruidosas**.
 - Para evitar los artefactos, la VENC debe ajustarse aproximadamente un **10% por encima de la velocidad máxima esperable**.
-

TÉCNICA: VENC

REGIÓN EXAMINADA	VENC
AORTA	100-200 cm/s
	• Estenosis: 250-400 cm/s
	• Aneurisma: 0-100 cm/s
VENTRÍCULO	150 cm/s
VÁLVULAS CARDÍACAS	• Insuficiencia: 150 cm/s
	• Estenosis: 250-500 cm/s

Tabla 1. Puntos de referencia para la elección de VENC en distintos vasos sanguíneos o cavidades. [1]

SECUENCIA

- Como la PC cine 2D, 4D-Flow es una secuencia **eco de gradiente** con supresión de radiofrecuencia (**RF-spoiled**) con **TE y TR cortos** (2-4 y 5-7 ms respectivamente).
- No es preciso el uso de contraste i.v., pero el **gadolinio mejora la relación señal-ruido, la relación velocidad-ruido y el contraste** (diferenciación) entre la sangre y los tejidos.

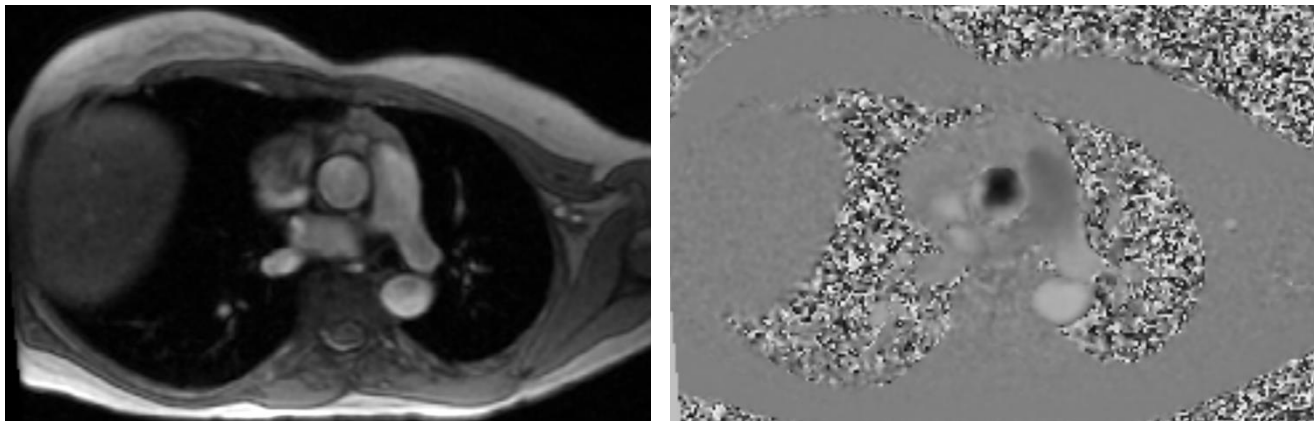


Fig. 1. Ejemplo de secuencia *phase contrast* que ha sido orientada perpendicularmente a la aorta ascendente. El flujo que se mueve ortogonal aparece negro mientras que el tejido estacionario queda gris.

TÉCNICA: *GATING*

- Las imágenes 4D-Flow se obtienen generalmente con **respiración libre**, por lo que se emplean **navegadores diafragmáticos**, cintas respiratorias o promediado de señales para minimizar los artefactos derivados del movimiento respiratorio.
 - La sincronización con el ciclo cardíaco se realiza mediante el registro **ECG** y de forma **retrospectiva**.
-

PREPROCESAMIENTO

- Los datos brutos del 4D-Flow se ven afectados por errores sistemáticos en la codificación de velocidad. Los principales fallos vienen derivados por la **heterogeneidad del campo magnético**, por los campos magnéticos concomitantes (**términos de Maxwell**) y como causa de las **corrientes eléctricas de Foucault**.
 - El **preprocesamiento** permite **paliar los errores de desplazamiento de fase de fondo**. Además, pueden aplicarse técnicas par la reducción del ruido (**denoising**) y del aliasing.
 - Tras la corrección, los datos deben **segmentarse** para diferenciar entre tejido estático y sangre en movimiento dentro de la luz vascular; esto puede realizarse manualmente o de forma automática.
-

VISUALIZACIÓN

- La **representación vectorial** de las velocidades de flujo puede parecer que es la más natural. La longitud y el color del vector correspondería a la magnitud de la velocidad y la cabeza de flecha a su dirección. No obstante, los vectores se superponen entre sí, ocultándose, lo que impide ver de forma adecuada el flujo.
- Existen otras soluciones de *software* para la evaluación cualitativa: restricción de vectores de velocidad codificados por color en planos de corte 2D o 3D, las líneas de corriente y p.ej. las trayectorias de partículas.

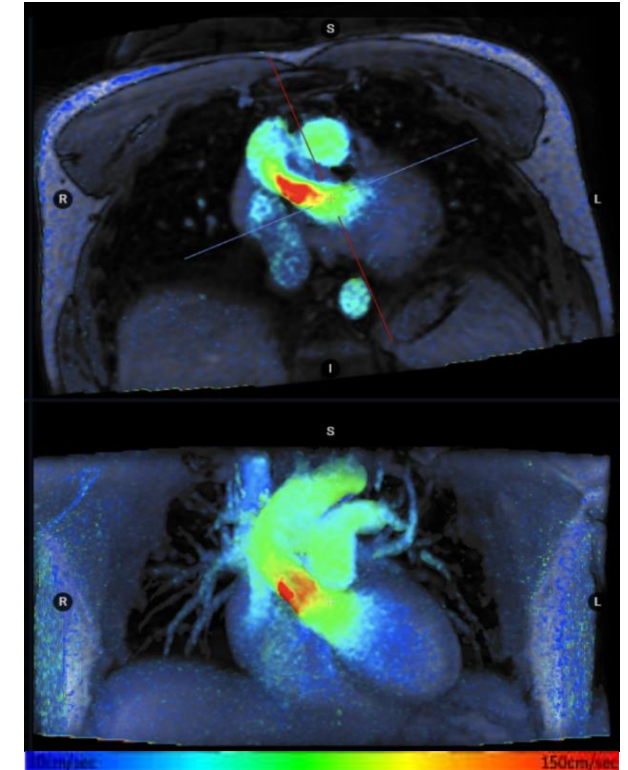


Fig. 2. Secuencia 4D-Flow: visualización de velocidades en plano codificadas por colores a través de la válvula aórtica.

ANÁLISIS CUANTITATIVO

- **Velocidad y volumen de flujo:** son los parámetros más simples pero también los más importantes.
 - **Flujos vorticiales:** son los movimientos circulares de un fluido.
 - Fisiológicos en VI, aorta ascendente, vasos pulmonares...
 - Patológicos: aneurismas, HTP, cardiopatías, valvulopatías, prótesis valvulares...
 - **Gradiente de presión:** la pérdida de presión en el sistema vascular produce aumento del trabajo cardíaco para mantener el flujo sanguíneo por lo que este parámetro se ha consolidado como biomarcador para evaluar las estenosis.
 - Otros: energía cinética turbulenta, estrés de la pared vascular...
-

APLICACIONES CLÍNICAS: CARDIOPATÍAS CONGÉNITAS

- En los últimos 15 años, el 4D-Flow ha sido ampliamente utilizado en el estudio de las cardiopatías congénitas.
 - En los pacientes con *shunts* entre las cámaras cardiacas, esta técnica permite visualizar y evaluar la localización de la comunicación y si hay inversión del *shunt* en las distintas fases cardiacas.
 - Cuando se sospecha su complejidad (p.ej. el síndrome del corazón derecho hipoplásico, la tetralogía de Fallot o la transposición de grandes vasos), las imágenes proporcionan información clave tanto para el diagnóstico como para la planificación quirúrgica.
 - Estos pacientes pueden llegar a la edad adulta y desarrollar complicaciones, convirtiéndose la RM también en la prueba de seguimiento de elección (dado el aumento del tamaño corporal y las cicatrices).
-

APLICACIONES CLÍNICAS: CARDIOPATÍAS CONGÉNITAS

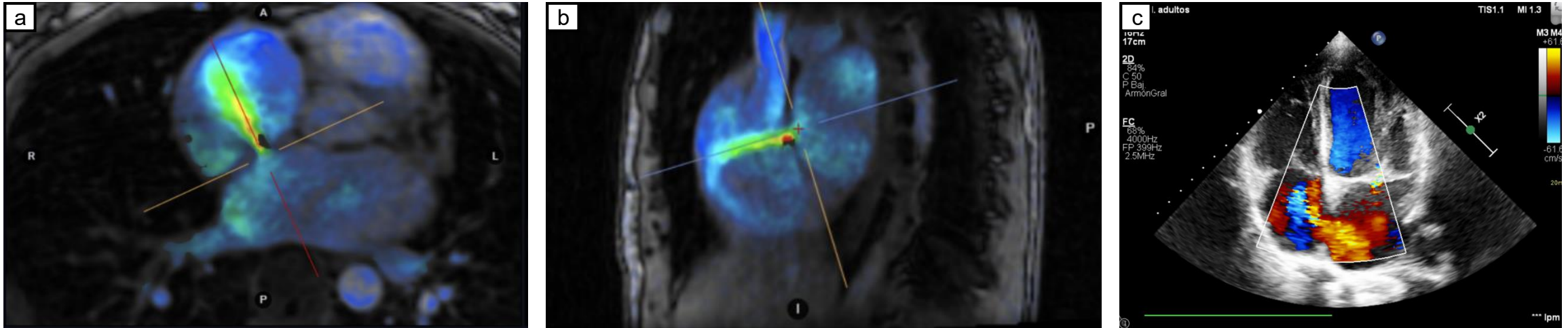


Fig. 3. a-b. Secuencia 4D-Flow postprocesada en la que se observa dilatación de ambas aurículas y un chorro compatible con comunicación interauricular (CIA), con cortocircuito izquierda a derecha y Qp/Qs estimado de 1,46. c. Correlación con las imágenes del ecocardiograma transtorácico (ETT) en ventana apical 4 cámaras, en la que se aprecia *jet* interauricular al estudio Doppler color.

APLICACIONES CLÍNICAS: CARDIOPATÍAS CONGÉNITAS

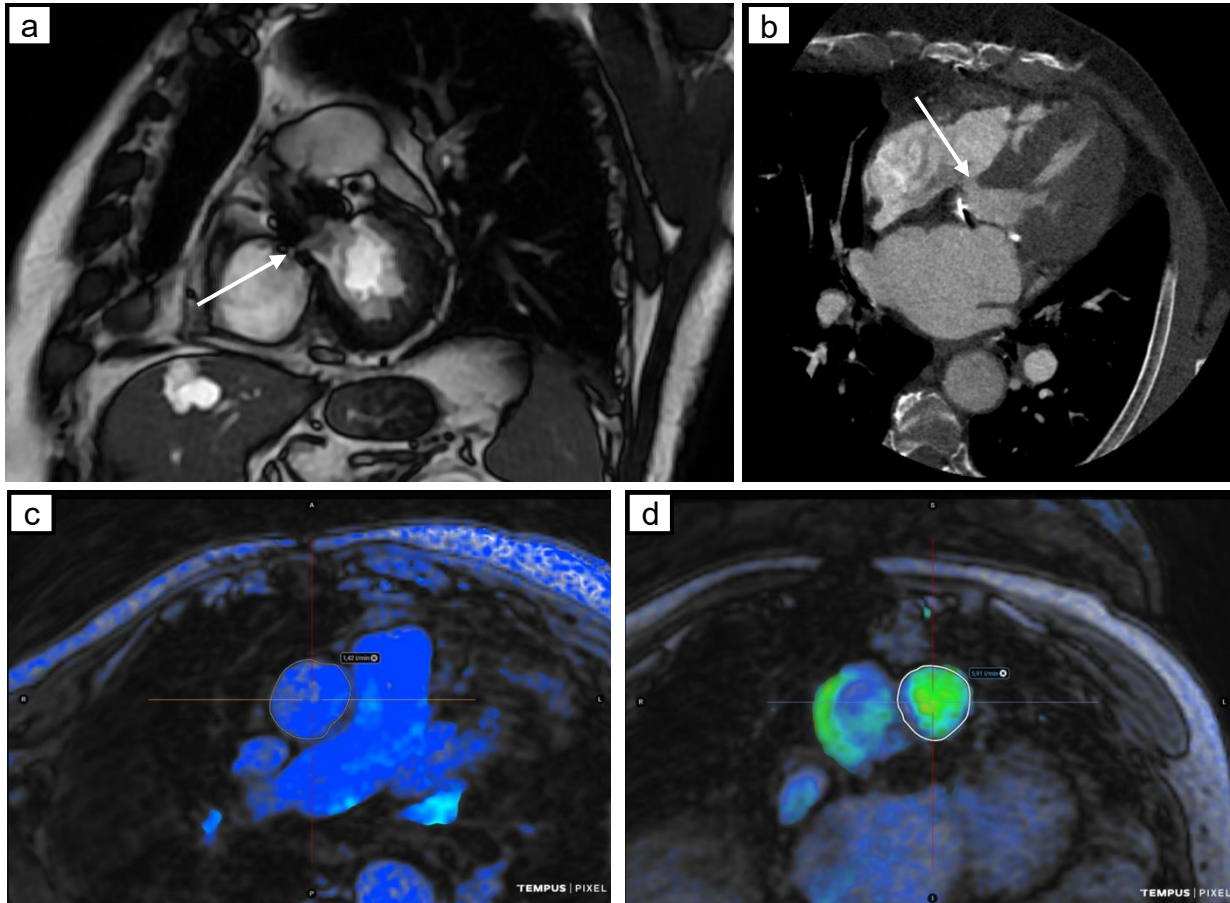


Fig. 4. **a.** Secuencia FLEET eje corto en la que se observa una comunicación interventricular (CIV) en el septo membranoso (flecha), justo por debajo del plano del anillo valvular (paciente portador de prótesis). **b.** Correlación con TC (flecha); éste se llevó a cabo previo cierre de orejuela. **c-d.** Se dibujaron contornos de flujo en la arteria pulmonar y en la aorta y se realizaron los siguientes cálculos hemodinámicos derivados del análisis 4D-Flow:

- Flujo pulmonar: Volumen sistólico: 120 mL/latido. Sin insuficiencia. Gasto derecho: 5,9 L/min.
 - Flujo aórtico: Volumen sistólico: 46 mL/latido. Volumen regurgitante por latido 17 mL. Fracción regurgitante 37% (insuficiencia protésica significativa). Gasto izquierdo: 2,26 L/min.
 - $Q_p/Q_s=2,6$ indicativo de cortocircuito izquierda-derecha significativo
- *Valor similar a secuencias con contraste de fase 2D (doble comprobación metodológica).*

APLICACIONES CLÍNICAS: VALVULOPATÍAS

- La utilidad del 4D-Flow para la evaluación de valvulopatías radica en su capacidad para visualizar y cuantificar de manera simultánea el flujo sanguíneo en todas las válvulas cardíacas en una sola adquisición.
 - Se evalúa de forma precisa la severidad de estenosis y regurgitaciones valvulares, similar al ecocardiograma. Además, se puede caracterizar la excentricidad (ángulo) y el área de los *jets* del flujo turbulento.
 - Debido a la variabilidad intercentro de la técnica y del análisis de 4D-Flow, así como por la falta de un “*gold standard*” para la cuantificación de regurgitación valvular, esta secuencia todavía no está completamente validada para este uso. No obstante, tiene potencial de convertirse en el nuevo método de referencia para la evaluación de lesiones valvulares.
-

APLICACIONES CLÍNICAS: VALVULOPATÍAS

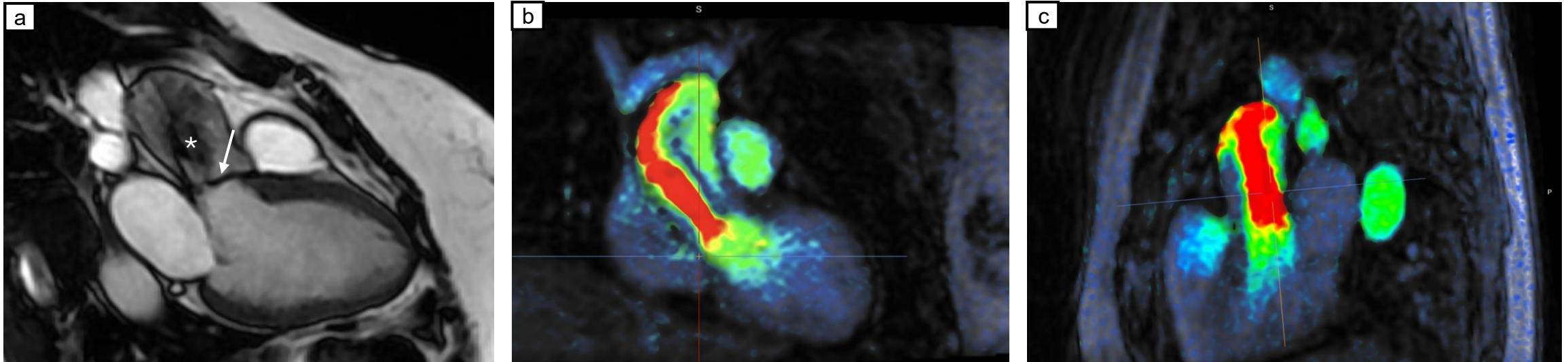


Fig. 5. **a.** Secuencia SSFP (*steady-state free precession*) en plano 3 cámaras en la que se identifica engrosamiento de los velos de la válvula aórtica (flecha) y el artefacto de flujo turbulento hipointenso (asterisco) por la estenosis secundaria. En el ecocardiograma la paciente presentaba válvula aórtica bicúspide por fusión de velos coronarios izquierdo y derecho sin rafe (Tipo I R-L). **b-c.** Secuencia 4D-Flow en la que se observa durante la sístole una alta velocidad en la raíz aórtica (donde está la estenosis valvular) y flujo turbulento en la aorta ascendente. Su análisis cuantitativo demuestra una estenosis moderada con gradiente pico de 51 mmHg.

APLICACIONES CLÍNICAS: VALVULOPATÍAS

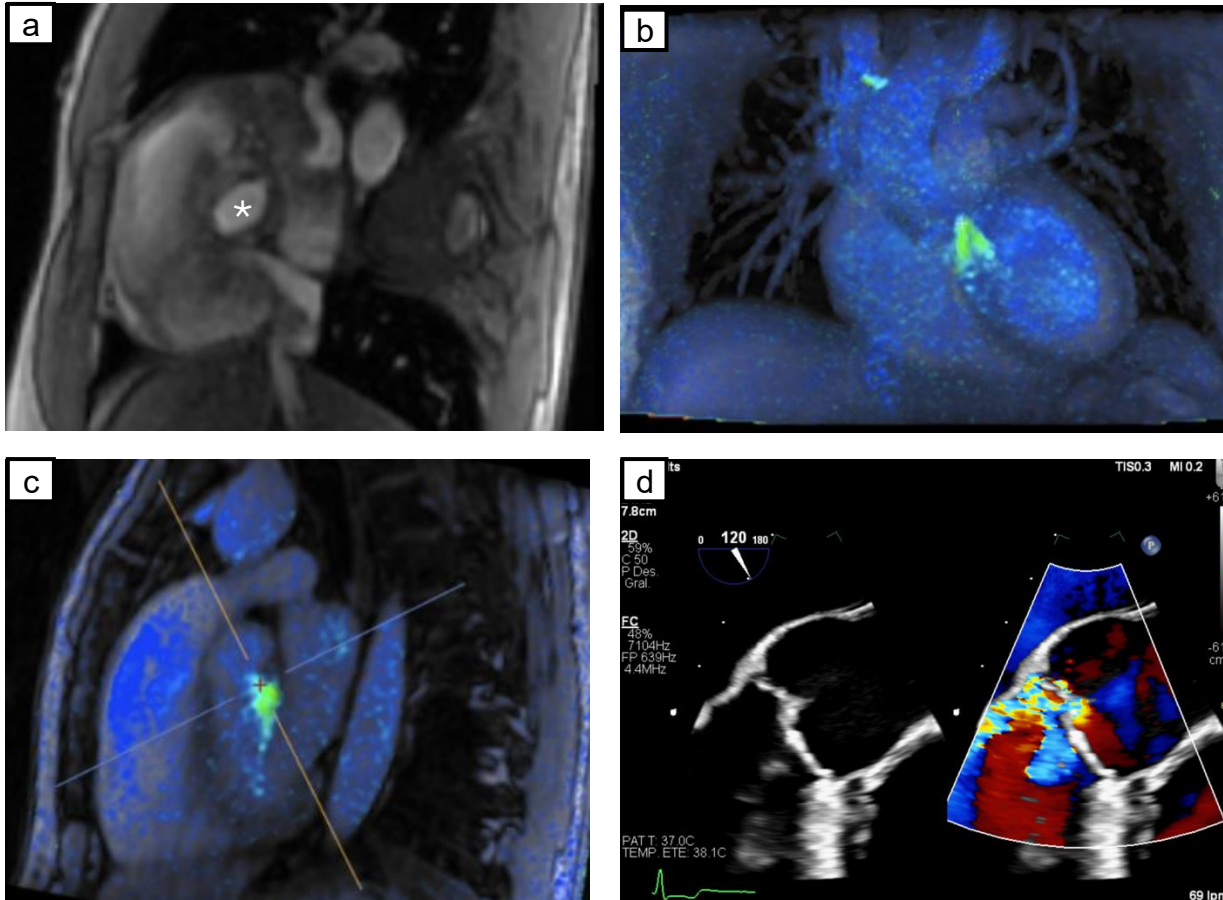


Fig. 6. Paciente con válvula aórtica bicúspide con fusión de velos izquierdo y derecho debido a la presencia de un minirrafe. **a.** Secuencia PC Cine en la que se observa apertura conservada de la válvula aórtica (asterisco), con un AVA por planimetría de 4,12 cm². **b-c.** Secuencia 4D-Flow en la que se identifica insuficiencia aórtica de grado leve-moderado, que produce un jet (color verde) dirigido hacia el velo mitral anterior. Se calcula un volumen regurgitante de 12,3 mL y una fracción regurgitante del 15%; estos valores coinciden con los obtenidos por PC Cine 2D, que son 12,67 mL y 12% respectivamente. **d.** Correlación con el ecocardiograma transesofágico (ETE), en el que se aprecia chorro con *aliasing* desde la válvula aórtica durante la diástole ventricular.

APLICACIONES CLÍNICAS: VALVULOPATÍAS

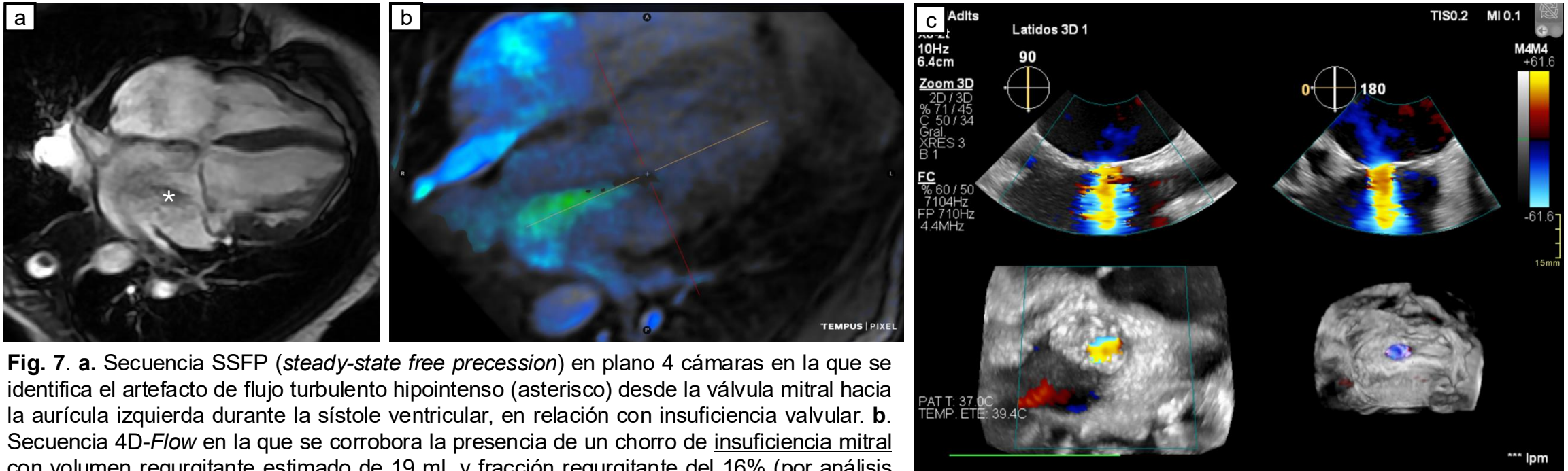


Fig. 7. a. Secuencia SSFP (*steady-state free precession*) en plano 4 cámaras en la que se identifica el artefacto de flujo turbulento hipointenso (asterisco) desde la válvula mitral hacia la aurícula izquierda durante la sístole ventricular, en relación con insuficiencia valvular. b. Secuencia 4D-Flow en la que se corrobora la presencia de un chorro de insuficiencia mitral con volumen regurgitante estimado de 19 mL y fracción regurgitante del 16% (por análisis volumétrico es de aproximadamente un 18%, concordante). c. Correlación con el ETT en el que se aprecia un *jet* con *aliasing* hacia la AI por insuficiencia mitral; la ecocardiografía 3D (imágenes inferiores) demuestra un cierre incompleto durante la sístole ventricular (defecto de coaptación).

APLICACIONES CLÍNICAS: VALVULOPATÍAS

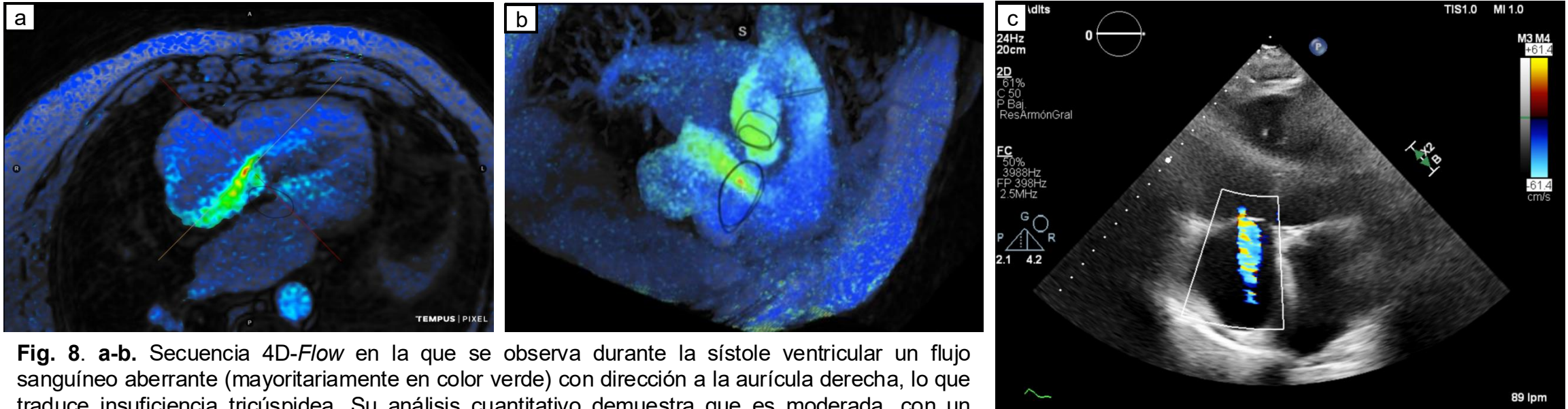


Fig. 8. a-b. Secuencia 4D-Flow en la que se observa durante la sístole ventricular un flujo sanguíneo aberrante (mayoritariamente en color verde) con dirección a la aurícula derecha, lo que traduce insuficiencia tricúspidea. Su análisis cuantitativo demuestra que es moderada, con un volumen regurgitante de 17 mL y una fracción de regurgitación del 26%. **c.** Correlación con las imágenes del ecocardiograma transtorácico en ventana apical 4 cámaras, en la que se aprecia chorro de insuficiencia tricúspide a con *aliasing* hacia la AD.

APLICACIONES CLÍNICAS: OTRAS INDICACIONES

- En **aortopatías** (como aneurismas o disecciones) el 4D-*Flow* permite p.ej. medir el estrés de la pared vascular y analizar gradientes de presión, lo que contribuye a estratificar el riesgo de progresión.
 - En **miocardiopatías** (isquémica, restrictiva, hipertrófica, dilatada...) el 4D-*Flow* facilita el análisis de la dinámica intracavitaria de flujos y presiones y la distribución de la energía cinética turbulenta, permitiendo identificar alteraciones mecánicas asociadas a la disfunción ventricular.
 - En la **hipertensión pulmonar** el 4D-*Flow* se utiliza para evaluar la distensibilidad de la arteria pulmonar, cuantificar el flujo retrogrado y analizar la presencia de flujos vorticales, como parámetros que se correlacionan con la severidad y el pronóstico de la enfermedad.
-

CONCLUSIONES

- El 4D-Flow permite la **visualización y cuantificación** de la **velocidad del flujo sanguíneo en tres direcciones** dentro del corazón y **a lo largo del tiempo**, lo que proporciona una **visión única** de los patrones complejos y, en definitiva, de la hemodinámica cardiaca.
 - Estas mediciones muestran una alta correlación con la técnica de PC CINE 2D. Además, la **evaluación retrospectiva** de los datos añade un valor práctico adicional.
 - Con tiempos de adquisición inferiores a 10 minutos puede integrarse eficazmente en la RM cardíaca clínica habitual, especialmente si se ha administrado gadolinio i.v..
-

CONCLUSIONES

- Estos beneficios se complementan con **ventajas diagnósticas, sobre todo en la evaluación de enfermedades valvulares y cortocircuitos (*shunts*)**. Así mismo, el 4D-*Flow* puede **complementar a la ecocardiografía** de rutina en la valoración de patologías como la disfunción ventricular o la hipertensión pulmonar.
 - Sin embargo, se requieren **más estudios longitudinales** y su estandarización para una adopción generalizada.
-

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sträter A, Huber A, Rudolph J, Berndt M, Rasper M, Rummeny EJ, Nadjiri J. 4D-Flow MRI: Technique and Applications. *Rofo*. 2018 Nov;190(11):1025-1035. English, German. doi: 10.1055/a-0647-2021. Epub 2018 Aug 13. PMID: 30103237.
 2. Reiter G, Reiter C, Ovcina I, Fuchsjäger M, Reiter U. Four-dimensional Flow MRI for a Dynamic Perspective on the Heart and Adjacent Great Vessels. *Radiology*. 2025 Aug;316(2):e242972. doi: 10.1148/radiol.242972. PMID: 40793945.
 3. Bissell MM, Raimondi F, Ait Ali L, Allen BD, Barker AJ, Bolger A, Burris N, Carhäll CJ, Collins JD, Ebberts T, Francois CJ, Frydrychowicz A, Garg P, Geiger J, Ha H, Hennemuth A, Hope MD, Hsiao A, Johnson K, Kozerke S, Ma LE, Markl M, Martins D, Messina M, Oechtering TH, van Ooij P, Rigsby C, Rodriguez-Palomares J, Roest AAW, Roldán-Alzate A, Schnell S, Sotelo J, Stuber M, Syed AB, Töger J, van der Geest R, Westenberg J, Zhong L, Zhong Y, Wieben O, Dyverfeldt P. 4D Flow cardiovascular magnetic resonance consensus statement: 2023 update. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2023 Jul 20;25(1):40. doi: 10.1186/s12968-023-00942-z. PMID: 37474977; PMCID: PMC10357639.
 4. Soulat G, McCarthy P, Markl M. 4D Flow with MRI. *Annu Rev Biomed Eng*. 2020 Jun 4;22:103-126. doi: 10.1146/annurev-bioeng-100219-110055. Epub 2020 Mar 10. PMID: 32155346.
 5. Gorecka M, Bissell MM, Higgins DM, Garg P, Plein S, Greenwood JP. Rationale and clinical applications of 4D flow cardiovascular magnetic resonance in assessment of valvular heart disease: a comprehensive review. *J Cardiovasc Magn Reson*. 2022 Aug 22;24(1):49. doi: 10.1186/s12968-022-00882-0. PMID: 35989320; PMCID: PMC9394062.
 6. Nicholls M. The value of 4D flow MRI in cardiac assessment. *Eur Heart J*. 2022 Mar 7;43(10):930-932. doi: 10.1093/eurheartj/ehab487. PMID: 34322700.
 7. Rizk J. 4D flow MRI applications in congenital heart disease. *Eur Radiol*. 2021 Feb;31(2):1160-1174. doi: 10.1007/s00330-020-07210-z. Epub 2020 Sep 1. PMID: 32870392.
 8. Oyama-Manabe N, Aikawa T, Tsuneta S, Manabe O. Clinical Applications of 4D Flow MR Imaging in Aortic Valvular and Congenital Heart Disease. *Magn Reson Med Sci*. 2022 Mar 1;21(2):319-326. doi: 10.2463/mrms.rev.2021-0030. Epub 2021 Jun 25. PMID: 34176866; PMCID: PMC9680549.
-