

REMODELADO AÓRTICO TRAS TEVAR: DETERMINANTES BIOMECÁNICOS DEL ESTRÉS PARIETAL Y LA DISCREPANCIA DE DISTENSIBILIDAD

Aortic Remodeling After TEVAR: Biomechanical Determinants of Wall Stress and Compliance Mismatch

 Vargas Lucio Brayan José ^{(1)*}
vargas.brayanj@gmail.com

 Vargas Lucio Erick Eduardo ⁽¹⁾
erick.vargas@esPOCH.edu.ec

 Badillo Peñafiel Sheyla Pamela ⁽³⁾
sheylasp1020@gmail.com

 Jaime Rolando Bravo Alvarado ⁽⁴⁾
drjaimebravo@yahoo.com

 Gaibor Gaibor Jhoans Sebastian ⁽²⁾
sebastiangg442@gmail.com

 Almache Palacios Alex Vinicio ⁽¹⁾
alex.almache@esPOCH.edu.ec

 Gaibor Moyano Ciboney Scarleth ⁽²⁾
ariesgaibor@gmail.com

⁽¹⁾ Médico General, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

⁽²⁾ Médico General, Universidad de las Américas, Quito, Ecuador.

⁽³⁾ Médico General, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.

⁽⁴⁾ Médico Especialista en Cardiología, Hospital General Puyo, Puyo, Ecuador.

Autor de correspondencia:

Brayan José Vargas Lucio. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Panamericana Sur km 1 ½ entre Av. Canónigo Ramos y Av. 11 de noviembre, código postal EC060155, Riobamba, Ecuador, Correo electrónico: vargas.brayanj@gmail.com, Teléfono: +593959065526

RESUMEN

Introducción: El *Thoracic Endovascular Aortic Repair* (TEVAR) representa una alternativa mínimamente invasiva a la cirugía convencional, se realiza mediante implante de un endoinjerto vía femoral, permitiendo excluir el flujo sanguíneo sin la necesidad de bypass. **Objetivo:** Analizar los determinantes biomecánicos del estrés parietal y la discrepancia de distensibilidad asociados al remodelado aórtico tras TEVAR. **Metodología:** Se realizó una revisión narrativa enfocada en enfermedad aórtica, utilizando bases de datos como PubMed, Scielo, Scopus y Google Académico como buscador complementario. Se identificaron 95 artículos, 75 en inglés y 20 en español de los cuales se incluyeron 41 posterior al cribado y evaluación de elegibilidad. **Resultados:** La discrepancia de distensibilidad entre el endoinjerto y la aorta nativa, con reducciones de hasta 50% en el segmento cubierto constituyó el principal determinante biomecánico identificado, asociado a alteración del efecto Windkessel, aumento de la velocidad de onda de pulso y sobrecarga ventricular izquierda. Factores geométricos (curvatura del arco, diámetro aórtico) y protésicos (fuerza radial, oversizing, material del dispositivo) determinaron la dimensión de esta discrepancia y el riesgo de remodelado negativo. **Discusión:** Estos hallazgos sugieren que la alteración del efecto Windkessel constituye un eje fisiopatológico común que integra manifestaciones clínicas previamente descritas de forma independiente, aunque la evidencia disponible proviene mayoritariamente de estudios experimentales y computacionales, limitando la extrapolación clínica directa. **Conclusión:** La intensidad del estrés parietal y la discrepancia de distensibilidad inducidos por la endoprótesis se asocian a remodelado aórtico negativo, lo que respalda la utilidad de un seguimiento funcional sistemático en pacientes sometidos a TEVAR.

Palabras claves: Aorta, Endoprótesis, Procedimientos endovasculares, Hemodinámica.

ABSTRACT

Introduction: Thoracic Endovascular Aortic Repair (TEVAR) is a minimally invasive alternative to conventional open surgery. The procedure involves femoral delivery of an endovascular stent graft to exclude the diseased aortic segment from blood flow without the need for cardiopulmonary bypass. **Objective:** To analyze the biomechanical determinants of wall stress and compliance mismatch associated with aortic remodeling after TEVAR. **Methods:** A narrative review of the literature on aortic disease was conducted using PubMed, Scielo, Scopus, and Google Scholar as a supplementary search tool. A total of 95 articles were identified (75 in English and 20 in Spanish), of which 41 met the eligibility criteria and were included in the review. **Results:** Compliance mismatch between the stent graft and the native aorta, with reductions in vascular compliance of up to 50% in the treated segment, was the main biomechanical determinant identified. This mismatch was associated with impairment of the Windkessel effect, increased pulse wave velocity, and increased left ventricular afterload. Geometric factors (aortic arch curvature and aortic diameter) and device-related factors (radial force, graft oversizing, and stent graft material) influenced the magnitude of compliance mismatch and the risk of adverse aortic remodeling. **Discussion:** The findings suggest that impairment of the Windkessel effect represents a common pathophysiological mechanism underlying clinical manifestations previously described separately. However, the available evidence is derived mainly from experimental and computational studies, limiting its direct clinical applicability. **Conclusion:** The degree of wall stress and compliance mismatch induced by the stent graft is associated with adverse aortic remodeling, supporting the need for systematic functional follow-up in patients undergoing TEVAR.

Keywords: Aorta, Endoprosthesis, Endovascular procedures, Hemodynamics.

1. Introducción

El Thoracic Endovascular Aortic Repair (TEVAR) es un tratamiento endovascular desarrollado como alternativa menos invasiva a la cirugía abierta para la corrección del aneurisma de aorta torácica o Thoracic aortic aneurysm (TAA). Consiste en la implantación de una endoprótesis (stent-graft) a nivel de la aorta mediante un acceso vascular, usualmente femoral, la cual suprime el flujo sanguíneo hacia el segmento afectado sin necesidad de bypass. (1–3) Está indicado en aneurisma de aorta torácica, rotura traumática aórtica, síndrome aórtico agudo (disección, hematoma intramural y úlcera penetrante) y coartación aórtica. (2) La disección aórtica es una patología cardiovascular grave y potencialmente mortal, con una incidencia anual estimada entre 2,5 y 7,1 casos por 100 000 habitantes. (4) Sin tratamiento, la mortalidad de las disecciones proximales aumenta entre 1% y 2% por hora durante las primeras 24 horas, lo que refleja la urgencia de un diagnóstico y manejo oportunos. (5) A nivel global, esta carga es considerable: según el Global Burden of Disease, en 2021 se registraron aproximadamente 153 927 muertes por disección y aneurisma aórtico. (6)

El TEVAR se ha consolidado como el tratamiento de elección en disección tipo B (clasificación de Stanford, que distingue disecciones con afectación de aorta ascendente —Tipo A— de aquellas exclusivas de aorta descendente —Tipo B—), al promover la trombosis del falso lumen y la expansión del lumen verdadero, fenómeno denominado remodelado positivo. (7,8) Urlick et al. describen remodelado positivo en 55-87% del segmento torácico proximal tras TEVAR por disección tipo B crónica, con mayor riesgo de remodelado negativo en la aorta distal y en pacientes con mayor diámetro preoperatorio o intervención tardía; en esta serie, la mortalidad aórtica específica a 10 años fue de 8%, frente a una mortalidad global de 46%. (9) En aneurismas torácicos degenerativos (no disecantes), Tanious et al. reportan regresión o estabilidad del saco aneurismático en 80% de los casos, con una supervivencia global a 10 años de 31,4%, mejor en pacientes con remodelado positivo. (10,11) Estas cifras muestran que el remodelado aórtico es un proceso multifactorial cuyo comportamiento aún no se explica completamente por variables clínicas o morfológicas clásicas.

Entre los cambios fisiológicos secundarios a TEVAR, un determinante potencial es el comportamiento biomecánico de la pared aórtica

y de la endoprótesis. En un modelo experimental in vitro de flujo aórtico simulado, Shahbad et al. encontraron que la endoprótesis produce una expansión radial limitada del segmento tratado, con deterioro de la dinámica arterial normal y generación de nuevos puntos de reflexión de onda; esto favorece fallos mecánicos (endofugas, remodelado patológico, migración, fatiga estructural) y un incremento secundario de la poscarga ventricular izquierda, con repercusión en morbilidad cardiovascular. (12) De forma similar, otros estudios señalan que las variaciones de estrés y strain de la pared aórtica durante el ciclo cardíaco se asocian con alteraciones estructurales y progresión de enfermedad aórtica. (13,14) El wall shear stress y el estrés circunferencial, cuando superan la capacidad adaptativa de la matriz extracelular, promueven degradación de fibras elásticas y reorganización del colágeno, comprometiendo la capacidad de la pared para tolerar la carga mecánica. (15) Sin embargo, la literatura disponible aborda estos hallazgos biomecánicos y los desenlaces clínicos de remodelado de forma independiente, sin integrar cómo la discrepancia de distensibilidad entre la endoprótesis rígida y la aorta nativa podría aclarar la variabilidad en el remodelado observada entre pacientes.

La ausencia de síntesis entre determinantes biomecánicos y conclusiones del remodelado tras TEVAR, constituye el problema que motiva la presente revisión. Nos planteamos la siguiente pregunta de investigación: En pacientes adultos sometidos a TEVAR por patología aórtica torácica, ¿la magnitud del estrés parietal y la discrepancia de distensibilidad inducidos por la endoprótesis, en comparación con pacientes que presentan menor alteración biomecánica, se asocian con un patrón de remodelado aórtico negativo y peor evolución clínica? El objetivo de esta revisión narrativa es analizar los determinantes biomecánicos del estrés parietal y la discrepancia de distensibilidad asociados al remodelado aórtico tras TEVAR, con el fin de sintetizar la evidencia disponible y ofrecer un marco integrado que oriente la evaluación clínica y el seguimiento de estos pacientes.

2. Metodología

Se realizó una revisión bibliográfica narrativa y no sistemática, debido a las condiciones del objeto de estudio: la integración de evidencia biomecánica con complicaciones clínicas del remodelado aórtico responde a un enfoque interpretativo y de integración conceptual. El alcance de esta revisión

se limita a los determinantes biomecánicos del remodelado aórtico tras la reparación endovascular de la aorta torácica (TEVAR), por patología aórtica torácica, incluyendo disección tipo B, aneurisma torácico degenerativo y lesión traumática de la aorta torácica. Se consideraron como evidencia válida tanto estudios clínicos (observacionales, de cohorte, registros) como estudios experimentales in vitro/ex vivo, modelos animales in vivo y estudios computacionales (dinámica de fluidos, elementos finitos, interacción fluido-estructura). Los determinantes biomecánicos específicos analizados incluyen el estrés parietal (circunferencial y de cizallamiento), la discrepancia de distensibilidad entre la endoprótesis y la aorta nativa, y el efecto Windkessel. Quedan fuera del alcance de esta revisión el remodelado aórtico asociado a cirugía abierta, el TEVAR en aorta abdominal, y los aspectos técnicos del diseño o composición de materiales de las endoprótesis no relacionados directamente con su comportamiento biomecánico "in situ".

2.1. Criterios de elegibilidad

Se incluyeron artículos publicados entre los años 2021 y 2026 en idioma inglés y español. Fueron considerados estudios relacionados con el remodelado aórtico posterior al TEVAR, el estrés parietal, la discrepancia de distensibilidad, el efecto Windkessel y otros determinantes biomecánicos asociados. Se incluyeron revisiones sistemáticas, metaanálisis y estudios computacionales.

Se excluyeron artículos duplicados, publicaciones fuera del rango temporal establecido y estudios cuyo contenido no guardaba relación directa con el tema de investigación.

2.2. Fuentes de información

La búsqueda bibliográfica se realizó durante la primera semana de enero de 2026 desde el viernes 2 al jueves 8, utilizando las bases de datos PubMed, SciELO y Scopus. Adicionalmente, se empleó Google Académico como buscador complementario para localizar artículos publicados en revistas científicas y repositorios académicos. Se incluyeron entre las fuentes de información: revisiones sistemáticas, metaanálisis, guías de práctica clínica, revisiones narrativas, análisis de registros, estudios observacionales clínicos, estudios experimentales in vitro/ex vivo, estudios experimentales in vivo (animal) y estudios computacionales como *Finite Element Analysis* (FEA), *Fluid-Structure Interaction* (FSI) y *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

2.3. Estrategia de búsqueda

Se utilizaron términos de búsqueda relacionados con el tema de estudio, incluyendo las palabras clave: "TEVAR", "Remodelado aórtico", "Aorta" y "Determinantes biomecánicos". Combinando términos MeSH/DeCS y lenguaje libre mediante los operadores booleanos AND y OR. La ecuación utilizada en PubMed fue: ("thoracic endovascular aortic repair"[Title/Abstract] OR "TEVAR"[Title/Abstract]) AND ("vascular remodeling"[MeSH Terms] OR "wall stress"[Title/Abstract] OR "compliance mismatch"[Title/Abstract] OR "Windkessel effect"[Title/Abstract])

Esta ecuación se adaptó a la sintaxis propia de cada base de datos consultada. No se aplicaron filtros de especie ni de tipo de artículo en el motor de búsqueda; los filtros de idioma y rango temporal se aplicaron de forma manual durante el cribado.

2.4. Proceso de extracción de datos

Se identificaron inicialmente 95 artículos, de los cuales 75 correspondieron a publicaciones en inglés y 20 en español. Los registros recuperados fueron organizados mediante el software de gestión bibliográfica Mendeley. Posteriormente, la selección estuvo a cargo de 2 revisores de forma independiente con resolución de desacuerdos por consenso. Se eliminaron los documentos duplicados y se realizó una revisión de títulos y resúmenes para determinar su pertinencia. Los estudios seleccionados fueron analizados de manera detallada considerando los criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos. De los 95 registros identificados, se eliminaron 3 duplicados, quedando 92 registros para cribado por título y resumen. Tras esta fase se excluyeron 42 registros por no cumplir los criterios de elegibilidad, principalmente por falta de relación directa con determinantes biomecánicos del remodelado aórtico. Se evaluaron a texto completo 50 artículos, de los cuales se excluyeron 9 adicionales por no encontrarse dentro de un rango temporal adecuado. Finalmente, se incluyeron 41 estudios en la revisión narrativa.

2.5. Evaluación de sesgo y calidad de los estudios

Al tratarse de una revisión narrativa, no se aplicó una herramienta formal de riesgo de sesgo como Cochrane RoB o AMSTAR-2. En su lugar, se realizó una valoración cualitativa del rigor metodológico de cada estudio incluido según los criterios del *Oxford Centre for Evidence-Based Medicine* (OCEBM), considerando aspectos como la claridad

de los objetivos, la descripción de la metodología de búsqueda y la solidez de las conclusiones respecto a la evidencia presentada.

2.6. Consideraciones éticas

Al tratarse de una revisión bibliográfica basada exclusivamente en fuentes secundarias de información científica previamente publicadas, no fue necesaria la participación de seres humanos ni la intervención sobre animales. Se respetaron los principios éticos de integridad académica mediante la adecuada citación y referenciación de las fuentes consultadas.

2.7. Limitaciones

Entre las limitaciones de esta revisión se encuentran la restricción temporal de los estudios incluidos, la selección de publicaciones

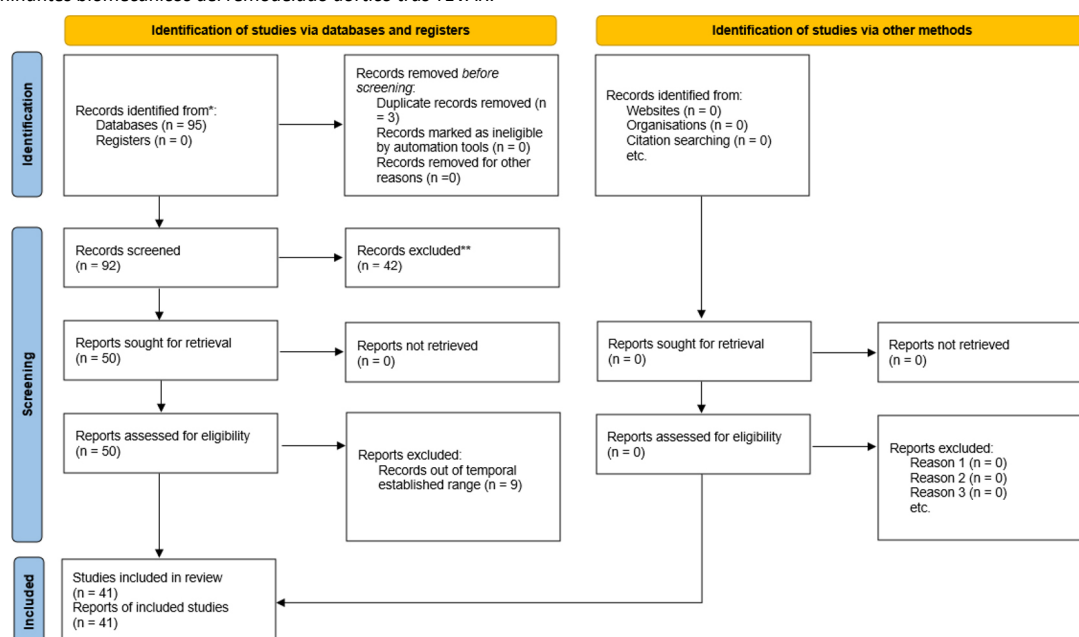
únicamente en inglés y español, y la posible exclusión de investigaciones relevantes no indexadas en las bases de datos consultadas. Asimismo, al tratarse de una revisión narrativa, los resultados pueden estar sujetos a sesgos inherentes al proceso de selección e interpretación de la literatura.

3. Resultados

3.1. Selección de estudios

El proceso de identificación y selección de los estudios incluidos en la presente revisión se resume en la Figura 1. De un total de 95 registros identificados en las bases de datos consultadas, se incluyeron finalmente 41 estudios tras el proceso de cribado y evaluación de elegibilidad, descrito en la sección de Métodos.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de identificación, cribado, elegibilidad e inclusión de estudios en la revisión narrativa sobre determinantes biomecánicos del remodelado aórtico tras TEVAR.



Nota: Diagrama elaborado según la plantilla de Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71. doi:10.1136/bmj.n71.

3.2. Alteraciones biomecánicas inducidas por TEVAR y discrepancia de distensibilidad

El TEVAR introduce un *stent-graft* significativamente más rígido que la aorta nativa, lo que genera una reducción marcada de distensibilidad segmentaria en la zona implantada, de esta manera también provoca una transición abrupta de rigidez entre el segmento

estentado y la aorta. Kamenskiy et al. atribuyen que este fenómeno, conocido como discrepancia de distensibilidad o *compliance mismatch*, puede disminuir hasta un 50% la distensibilidad del segmento cubierto por el injerto, mientras que los segmentos proximal y distal conservan su elasticidad, creando un gradiente de rigidez que produce alteraciones en la mecánica aórtica normal. Qiao et al. evaluaron las implicaciones

biomecánicas y encontraron que esta rigidez afecta a la impedancia vascular, aumentando la reflexión de onda en la interfaz entre el *stent-graft* y la aorta nativa. Simultáneamente se produce una sobrecarga proximal con mayor presión y estrés en la aorta ascendente y el ventrículo izquierdo, así como un aumento del estrés distal, predisponiendo a dilatación, disecación o aneurisma. (16–20)

3.3. Remodelado aórtico posterior a TEVAR

A pesar de los avances logrados con el TEVAR en el tratamiento de las disecciones aórticas, el remodelado de la aorta no siempre ocurre de manera completa a lo largo de todo el eje vascular. Aunque la trombosis de la falsa luz y la reducción del diámetro suelen observarse en la aorta torácica proximal; en los segmentos distales puede persistir una relaminación incompleta del *flap intimal*. Esta situación favorece la permanencia de flujo en la falsa luz y condiciona un remodelamiento aórtico incompleto, que puede asociarse con dilatación progresiva del segmento distal. (21)

Mandigers et al. en su revisión sistemática abordan la modificación cardíaca y aórtica a largo plazo post TEVAR para tratamiento de *Blunt Thoracic Aortic Injury* (BTAI) donde resaltan un incremento importante en la rigidez aórtica, presión arterial, masa cardíaca y tamaño del diámetro aórtico posterior al procedimiento en pacientes jóvenes. En el caso de la rigidez aórtica, por medio de la medición del *Pulse Wave Velocity* (PWV) aumentada se podía estimar la rigidez de la aorta también aumentada. La presión arterial, medida previamente, se mostraba significativamente aumentada. La masa cardíaca cuantificada mediante tomografía y comparada con datos previos a la intervención muestra incremento significativo de la masa del ventrículo izquierdo, correspondiendo a descubrimientos computacionales que evidencian el aumento del trabajo sistólico del ventrículo izquierdo, debido al *mismatch* entre la rigidez del *stent-graft* y la aorta. En relación a la dilatación aórtica, se confirma un aumento significativo en la dilatación en diferentes segmentos *post* TEVAR, con aumento del diámetro y la tasa de crecimiento de la aorta ascendente, esto demuestra una correlación con la edad de los pacientes, encontrando que los pacientes jóvenes presentan mejores propiedades mecánicas elásticas a nivel de la pared aórtica. (22)

3.4. Determinantes biomecánicos del remodelado aórtico

3.4.1 Curvatura del arco aórtico

La curvatura del arco aórtico es uno de los factores geométricos más significativos en el comportamiento del *stent* posterior a TEVAR. En las porciones superiores de la curvatura, la distribución de las fuerzas radiales sobre la pared vascular secundarias a la presencia del dispositivo son propiamente desproporcionadas. La presión se concentra en la curvatura mayor, llevando a la aposición parcial del extremo proximal del *stent*, conocido como *bird-beak* en consecuencia, perjudicando la integridad del sellado. Shahbazian et al. desarrollaron un modelo computacional que vincula el ángulo del arco como principal predictor geométrico de la evolución a largo plazo. (23) Las fuerzas de desplazamientos vectoriales asimismo son dependientes de la curvatura; estas actúan a nivel del dispositivo continuamente. Sturla et al. mencionan que en arcos de anatomía bovina, las fuerzas consiguen magnitudes que superan el rango de anclaje de múltiples dispositivos en el mercado, lo que significa un riesgo de migración tardía y endofugas tipo I proximales. La variación de la curvatura en la extensión del arco se ha instaurado como un mejor medidor geométrico frente al diámetro aórtico máximo en la predicción de resultados post TEVAR. (24)

3.4.2 Diámetro aórtico

El diámetro aórtico es un condicionante de la estructura del remodelado post-TEVAR, con influencia en la selección del dispositivo y en la trayectoria a largo plazo. Diámetros iniciales de falsa luz elevados presentan menor expansión de la luz verdadera pero con mayor riesgo de expansión aórtica tardía, indistintamente de la técnica usada para la implantación. Dong et al. han identificado al diámetro basal de la falsa luz y al número de re-entradas distales como predictores de expansión tardía posterior a TEVAR en disección aguda tipo B. (25)

3.4.3 Longitud del segmento cubierto

La porción aórtica cubierta por el dispositivo *stent-graft* configura la intensidad de la exclusión de la falsa luz y la redistribución de las fuerzas hemodinámicas en el recorrido del eje aórtico. A más longitud cubierta, mayor es la asociación con trombosis completa de la falsa luz torácica. En contraste, la extensión distal del *stent-graft* se relaciona con un aumento proporcional del

riesgo de isquemia de médula, por la afectación de arterias intercostales esenciales y de la arteria de Adamkiewicz. La extensión ideal de cobertura, radica en un balance clínico y biomecánico individual según la anatomía de las re-entradas distales y la extensión de la disección. (26-28)

3.5 Propiedades del Dispositivo

3.5.1 Radial force

La fuerza radial del *stent-graft*, entendida como la presión del dispositivo sobre la pared aórtica en situaciones de constricción, es el principal determinante biomecánico en la relación del dispositivo y la pared. Si la presión es muy elevada y supera el rango crítico, produce estrés sostenido circunferencial sobre la media aórtica que evoluciona a un proceso de adaptación patológico caracterizado por desorganización y fragmentación de las fibras elásticas, depósito de colágeno, cambio y pérdida del fenotipo del músculo liso vascular junto con aumento de la respuesta inflamatoria local. Pero si la presión no es suficiente, el sellado se ve comprometido, favoreciendo la migración del dispositivo. (27)

3.5.2 Oversizing

Entendido como el exceso en porcentaje del diámetro del dispositivo con respecto al diámetro aórtico real medido por angio-TAC. Este actúa como modulador directo de la fuerza radial aplicada sobre la pared. La relevancia clínica de este parámetro radica en la disección retrógrada tipo A, una complicación con mortalidad estimada del 42%. Xiang et al. muestran en su metaanálisis que un porcentaje mayor al 5% en *oversizing* en disección tipo B no complicada se asocia a mayor riesgo de disección retrógrada tipo A en el primer año postoperatorio, y con mayor riesgo durante los 30 primeros días y 12 meses posterior a la colocación del implante. (28) Un *oversizing* demasiado elevado (más del 20%) aumenta la fuerza radial sobre la pared de la aorta, lo cual incrementa el riesgo de complicaciones, principalmente: disección retrógrada tipo A y *graft-induced new entry* (SINE) distal. El *undersizing* ha sido explorado como alternativa en pacientes portadores de síndromes aórticos genéticos, donde la fragilidad parietal no permite un grado elevado de fuerza radial. (29)

3.5.3 Nitinol vs Acero

El nitinol posee ciertas propiedades como: superelasticidad, memoria de forma y resistencia

frente a la fatiga dependiente de la amplitud de deformación y no al estrés, a diferencia del acero inoxidable. Estas características le brindan mayor durabilidad ante la fuerza cíclica del pulso arterial y la geometría compleja de la aorta. El acero, por su rigidez, genera mayor desajuste de *compliance* en la interfaz dispositivo-pared, que se manifiesta como incremento de la velocidad de onda y de la presión del pulso proximal, este suceso supera el sitio local produciendo rigidez de la aorta, lo cual altera la función de Windkessel, eleva la poscarga del ventrículo izquierdo, disminuye la perfusión diastólica coronaria y genera nuevas zonas de reflexión de onda con lesión pulsátil sobre órganos blanco. (30-32)

3.6. Consecuencias hemodinámicas post TEVAR y complicaciones asociadas

Stonko et al. en un estudio experimental preclínico con modelos animales mencionan que post TEVAR, la aorta pierde esta *compliance* y con ella, la capacidad de adaptarse al efecto previamente explicado, con un pulso arterial no amortiguado con complicaciones hemodinámicas mecánicas y funcionales posteriores. (33)

Bokobza et al. mencionan el estudio de Vallerio (2019) donde la suma de la transición de la aorta nativa con el endoinjerto distal, produce un flujo sistólico inverso, este conduce a un aumento brusco de flujo, con afectación preferida por estructuras, donde fluyen presiones más altas como es el caso de la aorta ascendente, produciendo un remodelado vascular aórtico, con consecuente dilatación marcada. (34) En una revisión sistemática con metaanálisis realizada por Skrypnik et al. por primera vez demuestran la estrecha relación de la migración de endoprótesis post TEVAR, en donde refiere que en un grupo con endoinjerto de TEVAR, 70 de los 1 783 pacientes presentaron dicha migración, reportando una tasa de hasta el 3.9 %. Estos datos resaltan la asociación con elevadas tasas de morbilidad y posibles reintervenciones por endofugas. (35,36)

Dentro de las complicaciones más preocupantes post TEVAR, se encuentra la disección retrógrada de la aorta ascendente, poco frecuente, pero potencialmente mortal. Awiwi et al. estiman tasas de mortalidad que oscilan entre el 33 % y el 42 %, en un lapso aproximado de uno a veinte meses después del procedimiento. Los motivos principales descritos fueron las lesiones del propio injerto, la propia cirugía de desramificación y/o la progresión de la enfermedad aórtica latente.

(36) Una de las principales complicaciones *post* TEVAR, es la remodelación hemodinámica, consecuencia del desajuste aórtico nativo y el endoinjerto. En condiciones fisiológicas la aorta funciona como reservorio principal del volumen sistólico, mientras que durante diástole tiene una particular propiedad de elasticidad, permitiendo un impulso hacia periferia, esta interacción es conocida como efecto de Windkessel, lo que le da la particular y fundamental propiedad de propagación de la onda de pulso.

Entre los principales factores que alteran la hemodinamia sistémica se reconoce a la hipertensión arterial (HTA) como el factor modificable más significativo según Mandigers et al. hasta el 55 % de los pacientes sometidos a TEVAR presentan hipertensión como diagnóstico nuevo posterior a TEVAR, acompañado de aumento de tamaño del ventrículo izquierdo y aumento en la velocidad de onda de pulso (VOP). Este evento adverso se atribuye a la rigidificación aórtica secundaria a la presencia del *stent-graft*. (22,33) Otro factor a considerar es la VOP, reconocida como la velocidad de expansión de la onda generada por la eyección cardíaca en la extensión de la pared arterial. Se ha establecido como parámetro referencial para la cuantificación no invasiva de la rigidez aórtica. (33) Girardin et al. por medio de análisis por resonancia magnética cardiovascular, complementada con 4D Flow, ha demostrado que el valor de la VOP global es estadísticamente más elevada en pacientes *post* TEVAR, en relación a pacientes

sanos, demostrando que el efecto de la rigidez aórtica se extiende incluso más allá del segmento cubierto. (32)

De los 30 estudios sintetizados en la Tabla 1, el 53% (16/30) correspondió a evidencia de Nivel 5 según la jerarquía de pronóstico OCEBM —estudios experimentales *in vitro/ex vivo*, modelos animales y estudios computacionales—, mientras que un 33% (10/30) correspondió a estudios de cohorte clínica (Nivel 2) y solo un 13% (4/30) alcanzó el Nivel 1, representado por revisiones sistemáticas y una revisión de alcance de carácter general. Esta distribución refleja la condición de la evidencia: los determinantes biomecánicos específicos del remodelado aórtico como discrepancia de distensibilidad, estrés parietal, efecto Windkessel son de difícil cuantificación directa y prospectiva en seres humanos, por lo que su caracterización ha sido predominantemente por modelos experimentales y computacionales, mientras que los estudios de cohorte disponibles documentan desenlaces clínicos de remodelado sin medir directamente estas variables biomecánicas subyacentes. Es necesario mencionar que ninguna de las revisiones sistemáticas de Nivel 1 identificadas aborda de forma específica el estrés parietal o la discrepancia de distensibilidad como eje central de análisis, lo que evidencia la ausencia de síntesis de evidencia de alto nivel en esta intersección biomecánica-clínica y constituye, precisamente, el vacío de conocimiento que la presente revisión busca abordar.

Tabla 1. Estudios incluidos en la revisión narrativa sobre remodelado aórtico y determinantes biomecánicos *post* TEVAR, clasificados según el tipo de diseño, nivel de evidencia y hallazgo principal.

Ref	Autor	Título	Tipo de estudio	Nivel	Tema principal	Población/Muestra*	Hallazgo principal
1	Alsawas et al.	Effectiveness of Surgical Interventions for Thoracic Aortic Aneurysms	Revisión sistemática/metaanálisis	1	Cirugía vs. TEVAR en TAA	Pacientes con aneurisma de aorta torácica	TEVAR reduce morbilidad perioperatoria en pacientes seleccionados.
22	Mandigers et al.	Cardiac and Aortic Modifications After Endovascular Repair for Blunt Thoracic Aortic Injury	Revisión sistemática	1	Remodelado cardíaco/aórtico <i>post</i> -TEVAR	Pacientes con lesión traumática	Resume modificaciones cardíacas.
28	Bissacco et al.	Discussing on the Aortic Coverage in Type B Aortic Dissection Treatment: A Comprehensive Scoping Review	Revisión de alcance (scoping review)	1	Longitud óptima de cobertura del endoinjerto en disección tipo B	Pacientes con disección aórtica tipo B tratados con TEVAR	Características basales del paciente, de la disección, tipo de endoprótesis y comportamiento postoperatorio determinan la cobertura.
37	Skrypnik et al.	Late Endograft Migration After TEVAR	Revisión sistemática/metaanálisis	1	Migración tardía de endoprótesis	Pacientes sometidos a TEVAR	Factores y frecuencia.

4	Smedberg et al.	Aortic Dissection: Global Epidemiology	Cohorte poblacional	2	Incidencia/desenlace de disección aguda	Pacientes con disección aórtica	Describe incidencia y resultados clínicos.
10	Zhou et al.	Deep Learning Prediction for Distal Aortic Remodeling After TEVAR	Modelo predictivo (cohorte)	3	Predicción de remodelado distal	Pacientes con disección tipo B	Modelo predictivo.
17	Hauguel et al.	Impacts of TEVAR and Thrombus Load on Aortic Radial Deformation	Cohorte observacional	3	Deformación radial y trombo	Modelos experimentales	Influencia de trombo/TEVAR.
21	Vecchini et al.	Risk Factors for Incomplete Aortic Remodeling (STABILISE)	Cohorte multicéntrica	3	Remodelado incompleto	Pacientes con disección aórtica	Factores de remodelado incompleto.
7	Urlick et al.	Ten Year Clinical and Aortic Remodelling Outcomes Following Endovascular Repair	Cohorte observacional	3	Remodelado y mortalidad a 10 años	Pacientes con disección tipo B	Resultados clínicos y remodelado.
8	Tanious et al.	Thoracic Aortic Remodeling After a Decade of TEVAR Experience	Cohorte observacional	3	Remodelado torácico post-TEVAR	Pacientes sometidos a TEVAR	Describe remodelado aórtico.
9	Gillinov et al.	Long-term Outcomes of TEVAR Based on Pooled FDA Clinical Trials	Análisis agrupado (registros FDA)	3	Desenlaces a largo plazo	Pacientes incluidos en ensayos FDA	Resultados a largo plazo.
25	Dong et al.	Preoperative Predictors of Late Aortic Expansion	Cohorte observacional	3	Predictores de expansión tardía	Pacientes con disección tipo B	Predictores preoperatorios.
26	Nakamura et al.	Safe and Favorable Prognosis of TEVAR	Cohorte observacional	3	Pronóstico TEVAR preventivo	Pacientes con disección tipo B	Buenos resultados en bajo riesgo.
30	Xiang et al.	The Impact of Oversizing in TEVAR on Long-Term Outcomes	Cohorte retrospectiva	3	Oversizing y desenlaces	Pacientes con disección tipo B	Impacto sobre resultados.
40	Gil-Sala et al.	Geometric, Biomechanic and Haemodynamic Aortic Abnormalities Assessed by 4D Flow MRI	Cohorte observacional (4D-flow)	3	Anomalías biomecánicas post-trauma	Pacientes tratados con TEVAR	Alteraciones hemodinámicas.
41	Van Bakel et al.	Cardiac Remodelling Following TEVAR for Descending Aortic Aneurysms	Cohorte observacional	3	Remodelado cardíaco post-TEVAR	Pacientes con aneurisma torácico	Incremento de poscarga.
29	Bi et al.	Stent Graft-Induced High Wall Stress Promoted Aortic Wall Failure	Animal in vivo + computacional	5	Estrés parietal y falla de pared	Modelo porcino	Mayor estrés favorece lesión.
31	Al-Rustum & Afifi	Retrograde Aortic Dissection During TEVAR	Revisión narrativa	5	Disección retrógrada tipo A	No aplica	Prevención y tratamiento.
32	Liu X et al.	Optimizing Aortic Arch Stent-Graft Performance Through Material Science	Computacional (materiales)	5	Optimización de stent-graft	Ciencia de materiales	Optimización del stent.
33	Shahbad et al.	Effect of Stent-Graft Compliance on Hemodynamics and Aortic Stiffening	Animal in vivo	5	Compliance y rigidez porcina	Modelo porcino	Rigidez y hemodinámica.
34	Girardin et al.	Patient-Specific Haemodynamic Analysis of Virtual Grafting Strategies	Computacional (paciente-específico)	5	Compliance mismatch, hemodinamia	Modelo específico del paciente	Análisis hemodinámico.
35	Stonko et al.	TEVAR Acutely Augments Left Ventricular Biomechanics in an Animal Model	Animal in vivo	5	Biomecánica ventricular post-TEVAR	Animales	Aumento de poscarga.
36	Bokobza De la Rosa et al.	Aortic and Cardiovascular Remodelling After TEVAR for Blunt Traumatic Aortic Injury	Revisión narrativa	5	Remodelado en trauma	No aplica	Síntesis fisiológica.

38	A w i w i et al.	Complications of Thoracic Endovascular Aneurysm Repair (TEVAR): A Pictorial Review	Revisión pictórica	5	Complicaciones de TEVAR	No aplica	Resumen imagenológico.
39	Armour et al.	Patient-Specific Compliant Simulation Framework Informed by 4D MRI	Computacional (4D-MRI)	5	Simulación compliant post-TEVAR	Modelo específico del paciente	Simulación específica.
16	Agrafiotis et al.	Global and Local Stiffening of Ex Vivo-Perfused Stented Human Thoracic Aortas	Ex vivo humano	5	Rigidez de aorta estentada	Aortas humanas	Aumenta rigidez local y global.
18	K a - menskiy et al.	Preserving Aortic Stent Graft Attenuates Left Ventricular Remodelling	Animal in vivo	5	Compliance mismatch	Modelo porcino	≈50% menos distensibilidad del segmento cubierto.
19	Qiao Y et al.	Fluid-Structure Interaction: Biomechanical Implications of Endograft After TEVAR	Computacional (FSI)	5	Interacción fluido-estructura	Modelo computacional	Compliance mismatch aumenta reflexión de onda.
20	Li B et al.	Strongly Coupled Fluid-Structure Interaction Analysis of TEVAR	Computacional (FSI)	5	FSI en disección no-A no-B	Modelo computacional	Caso específico paciente.
23	Shahbazian et al.	Identification of Geometric and Mechanical Factors Predictive of Bird-Beak Configuration	Computacional	5	Bird-beak, curvatura del arco	Simulación	Factores geométricos.
24	Sturla et al.	Fast Approximate Quantification of Endovascular Stent Graft Displacement Forces	Computacional	5	Fuerzas de desplazamiento	Modelo bovino	Cuantificación aproximada.

Nota: Principales estudios incluidos en la revisión bibliográfica y sus aportes al conocimiento de los determinantes biomecánicos, remodelado aórtico y alteraciones hemodinámicas posteriores a la reparación endovascular torácica de la aorta (TEVAR). El nivel de evidencia se clasificó según la jerarquía de pronóstico del Oxford Centre for Evidence-Based Medicine (OCEBM) (Nivel 1: revisión sistemática de estudios de cohorte o revisión de alcance; Nivel 2: estudio de cohorte individual o análisis agrupado de registros; Nivel 5: razonamiento basado en mecanismos, incluyendo estudios experimentales in vitro/ex vivo, modelos animales y estudios computacionales). Abreviaturas: TEVAR, reparación endovascular de aorta torácica; TBAD, disección aórtica tipo B (Stanford); FSI, interacción fluido-estructura; 4D-MRI, resonancia magnética con reconstrucción de flujo en cuatro dimensiones.

4. Discusión

4.1. Discrepancia de distensibilidad y remodelado aórtico post TEVAR

La presente revisión evidencia que el remodelado aórtico posterior al TEVAR constituye un fenómeno complejo en el que interactúan factores geométricos, biomecánicos y hemodinámicos. Aunque el procedimiento ha demostrado una elevada eficacia para excluir la falsa luz y favorecer la expansión del lumen verdadero, la implantación de un endoinjerto introduce modificaciones sustanciales en las propiedades mecánicas de la aorta. Estas alteraciones no se limitan al segmento tratado, sino que pueden extenderse a estructuras vasculares y cardíacas alejadas, condicionando cambios funcionales de relevancia clínica. Los hallazgos analizados sugieren que la discrepancia de distensibilidad entre la prótesis y la aorta nativa constituye el eje

fisiopatológico central sobre el cual se desarrollan gran parte de las modificaciones observadas tras el procedimiento. No obstante, la dimensión de esta discrepancia varía de forma considerable acorde al modelo empleado: mientras que Kamenskiy et al. reportan disminución de hasta el 50 % de la distensibilidad en modelos porcinos vivos, los estudios computacionales de FSI de Qiao Y et al., Li B et al. no cuantifican una cifra proporcional comparable, sino que describen el evento en términos de reflexión de onda e impedancia, dificultando así una comparación cuantitativa entre ambos tipos de evidencia. (18-20)

4.2. Alteración del efecto Windkessel como mecanismo fisiopatológico central

El efecto Windkessel constituye uno de los principios fundamentales de la fisiología

cardiovascular. Gracias a la elasticidad de la aorta, una parte de la energía generada durante la contracción ventricular es almacenada temporalmente en la pared arterial y posteriormente liberada durante la diástole. Este mecanismo permite amortiguar las fluctuaciones de presión, reducir la carga cardíaca y mantener un flujo sanguíneo continuo hacia los órganos periféricos. (33)

La reducción de la distensibilidad inducida por el TEVAR altera significativamente este sistema de amortiguación fisiológica. Al disminuir la capacidad de almacenamiento energético de la aorta, la circulación arterial pierde parte de su función reguladora, favoreciendo una transmisión más directa de la energía pulsátil hacia la periferia. Como consecuencia, aumenta la velocidad de propagación de la onda de pulso y se modifican los patrones normales de reflexión de onda. (16-20,33) La relevancia de este fenómeno radica en que permite integrar múltiples hallazgos aparentemente independientes dentro de un mismo marco fisiopatológico. El aumento de la presión pulsátil, la sobrecarga ventricular izquierda, la dilatación de segmentos aórticos alejados del injerto y la progresión de la rigidez arterial pueden interpretarse como manifestaciones distintas de una alteración común: la pérdida parcial del comportamiento Windkessel de la aorta. (16-20)

4.3. Repercusión cardiovascular sistémica

Los hallazgos identificados en esta revisión sugieren que las consecuencias del TEVAR trascienden el ámbito estrictamente vascular. La rigidificación aórtica inducida por el endoinjerto produce modificaciones en la interacción entre el corazón y el árbol arterial, fenómeno conocido como acoplamiento ventrículo-arterial. (20)

Cuando la aorta pierde parte de su elasticidad, el ventrículo izquierdo debe generar presiones más elevadas para mantener un volumen sistólico adecuado. Esta situación incrementa la poscarga cardíaca y favorece procesos adaptativos como la hipertrofia ventricular izquierda. Aunque inicialmente estas modificaciones pueden representar una respuesta compensatoria, a largo plazo podrían contribuir al deterioro de la función cardíaca y al aumento del riesgo cardiovascular. (20,22)

Asimismo, la hipertensión arterial observada después del procedimiento podría interpretarse no solo como una comorbilidad asociada, sino también como una consecuencia directa de

las alteraciones biomecánicas inducidas por el dispositivo. El aumento de la velocidad de onda de pulso y de la rigidez arterial refleja cambios funcionales que podrían persistir durante años después de la intervención. (22, 37) Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar el seguimiento postoperatorio desde una perspectiva integral. Más allá de la evaluación anatómica mediante estudios de imagen, resulta necesario valorar periódicamente parámetros funcionales cardiovasculares que permitan detectar de forma temprana las consecuencias sistémicas del remodelado biomecánico.

4.4. Influencia de los determinantes geométricos y protésicos

Los resultados revisados demuestran que el comportamiento biomecánico posterior al TEVAR depende no solamente de la presencia del endoinjerto, sino también de la interacción entre las características anatómicas del paciente y las propiedades físicas del dispositivo implantado. (23) La geometría del arco aórtico desempeña un papel particularmente importante debido a su influencia sobre la distribución de fuerzas mecánicas. Curvaturas pronunciadas pueden favorecer zonas de concentración de estrés, alterar la aposición del dispositivo y aumentar la probabilidad de complicaciones relacionadas con el sellado proximal. De manera similar, el diámetro aórtico inicial y la extensión de la cobertura protésica condicionan la magnitud del remodelado vascular y la redistribución de las cargas hemodinámicas. (24) Las características propias del endoinjerto también poseen implicaciones relevantes. La fuerza radial, el grado de *oversizing* y los materiales de fabricación determinan en gran medida la intensidad de la interacción mecánica con la pared vascular. Un exceso de fuerza radial puede incrementar el daño parietal y favorecer complicaciones tardías, mientras que una fuerza insuficiente puede comprometer la estabilidad del implante. (27-29)

El umbral de riesgo identificado por Xiang et al. (más de 5% de *oversizing* se asocia a mayor riesgo de RTAD) es mucho más conservador que el punto de corte de > 20 % descrito por Al-Rstum, lo que indica que el margen de seguridad para el *oversizing* podría ser más limitado de lo supuesto, a pesar de que ambos estudios difieren en su diseño, siendo una cohorte retrospectiva contra una revisión narrativa. En este contexto, el desarrollo futuro de la terapia endovascular probablemente estará orientado hacia dispositivos capaces de reproducir con mayor fidelidad las propiedades biomecánicas

de la aorta nativa. La incorporación de materiales más flexibles, el diseño personalizado basado en modelos computacionales y la optimización de las estrategias de planificación preoperatoria podrían contribuir a disminuir la discrepancia de distensibilidad y mejorar los resultados a largo plazo. (30-32)

4.5. Límites de la evidencia disponible

Es necesario señalar que la interpretación de los hallazgos expuestos en esta revisión debe considerar las limitaciones propias de la evidencia disponible. Más de la mitad de los estudios corresponden a evidencia de nivel 5 acorde a la OCEBM, por lo cual no es posible su extrapolación directa a la práctica clínica, especialmente en el caso de modelos animales, cuya anatomía y propiedades biomecánicas son similares, pero no iguales a las humanas. De igual manera, los estudios computacionales de interacción de fluidos se basan en modelos geométricos aislados, por lo que la generalización de sus hallazgos no es viable. Por otro lado, los estudios de cohorte incluidos son heterogéneos debido a diferencias en tiempo de seguimiento, criterios para la definición de remodelado positivo o negativo, y poblaciones con diferentes indicaciones para TEVAR (disección tipo B, aneurisma degenerativo, trauma), lo que impide una comparación directa de sus resultados y limita una síntesis cuantitativa.

4.6. Implicaciones clínicas y perspectivas futuras

La combinación de la reflexión de onda, incremento del estrés distal y cambios en la deformación radial en conjunto, se asocian con mayor riesgo de complicaciones cardiovasculares, incluyendo hipertrofia ventricular izquierda, hipertensión persistente y progresión de aneurisma distal. Estas alteraciones enmarcan la necesidad de desarrollar *endografts* más compatibles biomecánicamente y de mantener una vigilancia intensiva post TEVAR para así disminuir los efectos adversos del *compliance mismatch* y preservar un remodelado aórtico adecuado. (20,38,39)

Esta revisión aporta una síntesis integradora de la evidencia biomecánica disponible (en su mayoría experimental y computacional) y los desenlaces clínicos del remodelado aórtico post-TEVAR. A diferencia de la bibliografía previa disponible, que se enfoca en conclusiones clínicas aisladas o en fenómenos biomecánicos particulares sin relación explícita con la clínica, el presente trabajo propone una unificación bajo la alteración del efecto Windkessel como eje fisiopatológico central, que

permite interpretar coherentemente hallazgos dispersos en la literatura, como la sobrecarga ventricular izquierda, la hipertensión de novo post-TEVAR y el remodelado aórtico distal secundario a endoinjerto.

La evidencia disponible sugiere varias líneas de investigación, de las cuales es posible delimitar claramente tres. En primer lugar, el desarrollo de estudios clínicos prospectivos que permita cuantificar directamente parámetros biomecánicos como velocidad de onda de pulso y distensibilidad segmentaria con desenlaces de remodelado en una misma cohorte de pacientes. Segundo, es necesario estandarizar definiciones y la cuantificación de la discrepancia de distensibilidad entre estudios, puesto que la heterogeneidad metodológica dificulta la comparación de hallazgos. Y, por último, el desarrollo de endoprótesis con propiedades más similares a la aorta nativa.

»» 5. Conclusión

La evidencia sintetizada en esta revisión responde afirmativamente a la pregunta de investigación planteada: la magnitud del estrés parietal y la discrepancia de distensibilidad inducidos por la endoprótesis se asocian con un patrón de remodelado aórtico negativo y una peor evolución clínica en pacientes sometidos a TEVAR. Los hallazgos del presente estudio ponen en evidencia la importancia del impacto hemodinámico de estos determinantes biomecánicos (a tensión parietal y su gradiente de distensibilidad post-injerto), los cuales, al no seguir un curso homogéneo al de la aorta nativa (con reducciones de hasta el 50% en el segmento cubierto), se convierten en un factor clave en el comportamiento aórtico, en su dinámica de flujo y en su propio remodelado, articulando fenómenos como la alteración del efecto Windkessel, la sobrecarga ventricular izquierda y la dilatación de segmentos distales no cubiertos por el injerto. Esta asociación se sustenta, sin embargo, mayoritariamente en evidencia experimental y computacional más que en estudios clínicos que midan directamente estas variables biomecánicas en pacientes, brecha que esta revisión identifica como prioritaria para la investigación futura.

La información reportada enfatiza la relevancia del seguimiento sistemático de los pacientes sometidos a TEVAR, lo que determina la necesidad de establecer un enfoque preventivo frente a las complicaciones expuestas en el presente artículo, incluyendo la disección retrógrada tipo A y la

migración tardía del injerto, incorporando junto a la evaluación anatómica convencional parámetros funcionales de rigidez arterial, y con ello una nueva orientación hacia las potenciales dianas de optimización tecnológica personalizada.

6. Declaración de conflicto de interés

No existen conflictos de interés por parte de los autores.

7. Limitación de responsabilidad

Los autores de este trabajo declaramos que todos los puntos de vista expresados en el presente documento son de nuestra entera responsabilidad.

8. Fuentes de apoyo

El financiamiento del presente trabajo fue a través de los propios autores.

9. Referencias bibliográficas

1. Alsawas M, Zaiem F, Larrea-Mantilla L, Almasri J, Erwin PJ, Upchurch GR, et al. Effectiveness of surgical interventions for thoracic aortic aneurysms: A systematic review and meta-analysis. *J Vasc Surg.* 2017 Oct;66(4):1258-1268.e8. doi:10.1016/j.jvs.2017.05.082 PMID: 28756047.
2. Upchurch GR, Escobar GA, Azizzadeh A, Beck AW, Conrad MF, Matsumura JS, et al. Society for Vascular Surgery clinical practice guidelines of thoracic endovascular aortic repair for descending thoracic aortic aneurysms. *J Vasc Surg.* 2021 Jan;73(1):55S-83S. doi:10.1016/j.jvs.2020.05.076 PMID: 32628988.
3. Yusefi M, Agrafiotis E, Regitnig P, Laufer G, Sommer G, Holzapfel GA, et al. TEVAR versus open aortic arch replacement in ex vivo perfused human thoracic aortas. *Acta Biomater.* 2025 Jan 15;192(6):140-50. doi:10.1016/j.actbio.2024.12.019 PMID: 39674239.
4. Smedberg C, Hultgren R, Olsson C, Steuer J. Incidence, presentation and outcome of acute aortic dissection: results from a population-based study. *Open Heart.* 2024 Mar 13;11(1):e002595. doi:10.1136/openhrt-2023-002595 PMID: 38485121.
5. Yin J, Liu F, Wang J, Yuan P, Wang S, Guo W. Aortic dissection: Global epidemiology. *Cardiol Plus.* 2022 Dec;7(4):151-61. doi:10.1097/CP9.0000000000000028
6. Liu H, Zhang X, Lu H. Global, Regional, and National Burden of Aortic Aneurysm and Its Attributable Risk Factors from 1990 to 2021: An Analysis of the Global Burden of Disease Study 2021. *Arch Iran Med.* 2025 Jul;28(7):374. doi:10.34172/aim.34264 PMID: 40886089.
7. Zhou M, Luo X, Wang X, Xie T, Wang Y, Shi Z, et al. Deep Learning Prediction for Distal Aortic Remodeling After Thoracic Endovascular Aortic Repair in Stanford Type B Aortic Dissection. *J Endovasc Ther.* 2024 Oct;31(5):910-8. doi:10.1177/15266028231160101 PMID: 36927177.
8. Ge YY, Rong D, Ge XH, Miao JH, Fan WD, Liu XP, et al. The 301 Classification: A Proposed Modification to the Stanford Type B Aortic Dissection Classification for Thoracic Endovascular Aortic Repair Prognostication. *Mayo Clin Proc.* 2020 Jul;95(7):1329-41. doi:10.1016/j.mayocp.2020.03.031 PMID: 32622443.
9. Urick D, Jensen CW, Vekstein AM, Sanaiha Y, Moya-Mendez M, Kang L, et al. Ten Year Clinical and Aortic Remodelling Outcomes following Endovascular Repair of Chronic Type B Aortic Dissection. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery.* 2025. doi:10.1016/j.ejvs.2025.09.039 PMID: 41005646.
10. Tanious A, Boitano L, Canha L, Chou EL, Wang LJ, Latz C, et al. Thoracic aortic remodeling with endografting after a decade of thoracic endovascular aortic repair experience. *J Vasc Surg.* 2021 Mar;73(3):844-9. doi:10.1016/j.jvs.2020.06.120 PMID: 32707385.
11. Gillinov LA, Wang GJ, Goel NJ, Catalano MA, Szeto WY, Kalapatapu VR, et al. Long-term outcomes of thoracic endovascular aortic repair for descending thoracic aortic aneurysms based on pooled results from FDA clinical trials. *J Vasc Surg.* 2025 Sep;82(3):770-779.e2. doi:10.1016/j.jvs.2025.05.038 PMID: 40436328.
12. Shahbad R, Zermeno E, Razian SA, Maleckis K, Jadidi M, Desyatova A. EFFECT OF STENT-

- GRAFT LENGTH AND COMPLIANCE ON AORTIC HEMODYNAMICS IN A BENCH-TOP PHYSIOLOGICAL FLOW CIRCUIT. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2025 Feb;174:107269. doi:10.1016/j.jmbbm.2025.107269 PMID: 41274191.
13. Guo X, Gong C, Zhai Y, Yu H, Li J, Sun H, et al. Biomechanical characterization of normal and pathological human ascending aortic tissues via biaxial testing Experiment, constitutive modeling and finite element analysis. *Comput Biol Med.* 2023 Nov;166(2):107561. doi:10.1016/j.combiomed.2023.107561 PMID: 37857134.
 14. Spronck B, Latorre M, Wang M, Mehta S, Caulk AW, Ren P, et al. Excessive adventitial stress drives inflammation-mediated fibrosis in hypertensive aortic remodelling in mice. *J R Soc Interface.* 2021 Jul;18(180). doi:10.1098/rsif.2021.0336 PMID: 34314650.
 15. Qiao M, Li Y, Yan S, Zhang RJ, Dong H. Modulation of arterial wall remodeling by mechanical stress: Focus on abdominal aortic aneurysm. *Vascular Medicine (United Kingdom).* 2025 Apr;30(2):238–49. doi:10.1177/1358863X241309836 PMID: 39895313.
 16. Agrafiotis E, Mayer C, Grabenwöger M, Zimpfer D, Regitnig P, Mächler H, et al. Global and local stiffening of ex vivo-perfused stented human thoracic aortas: A mock circulation study. *Acta Biomater.* 2023 Apr 15;161:170–83. doi:10.1016/j.actbio.2023.02.028 PMID: 36849029.
 17. Hauguel A, Bondesson J, Azarine A, Kasani K, Barakat AI, Haulon S, et al. Impacts of Thoracic Endovascular Aortic Repair and Thrombus Load on Aortic Radial Deformation. *J Endovasc Ther.* 2025. doi:10.1177/15266028251339347 PMID: 40357803.
 18. Kamenskiy A, Kuniyil S, Shahbad R, Zermeno E, Maleckis K, MacTaggart J, et al. Windkessel Preserving Aortic Stent Graft Attenuates Left Ventricular Remodelling after Thoracic Endovascular Aortic Repair in a Porcine Model. *Eur J Vasc Endovasc Surg.* 2026 Feb. doi:10.1016/j.ejvs.2026.02.015 PMID: 41708050.
 19. Qiao Y, Mao L, Ding Y, Zhu T, Luo K, Fan J. Fluid-structure interaction: Insights into biomechanical implications of endograft after thoracic endovascular aortic repair. *Comput Biol Med.* 2021 Nov;138. doi:10.1016/j.combiomed.2021.104882 PMID: 34600328.
 20. Li B, Zhu Y, Wang K, Lepidi S, D'Oria M, Xu XY. Strongly coupled fluid-structure interaction analysis of TEVAR with double-branched endograft for non-A non-B aortic dissection: a patient-specific case study. *J Biomech.* 2026 Jan;195. doi:10.1016/j.jbiomech.2025.113126 PMID: 41391440.
 21. Vecchini F, Hauptert G, Baudry A, Mancini J, Dumur L, Martinez R, et al. Risk Factors for Incomplete Aortic Remodeling With Stent-Assisted Balloon-Induced Intimal Disruption and Relamination in Aortic Dissection Repair for Complicated Aortic Dissection: Results of a Multicenter Study. *Journal of Endovascular Therapy.* 2024 Feb;31(1):69–79. doi:10.1177/15266028221111984 PMID: 35880296.
 22. Mandigers TJ, Bissacco D, Domanin M, D'Alessio I, Tolva VS, Piffaretti G, et al. Cardiac and Aortic Modifications After Endovascular Repair for Blunt Thoracic Aortic Injury: A Systematic Review. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery.* 2022 Aug;64(2–3):176–87. doi:10.1016/j.ejvs.2022.05.004 PMID: 35537638.
 23. Shahbazian N, Romero DA, Forbes TL, Amon CH. Identification of geometric and mechanical factors predictive of bird-beak configuration in thoracic endovascular aortic repair using computational models of stent graft deployment. *JVS Vasc Sci.* 2022 Jan;3:259. doi:10.1016/j.jvssci.2022.05.056 PMID: 35938091.
 24. Sturla F, Caimi A, Romarowski RM, Nano G, Glauber M, Redaelli A, et al. Fast Approximate Quantification of Endovascular Stent Graft Displacement Forces in the Bovine Aortic Arch Variant. *J Endovasc Ther.* 2023 Oct;30(5):756–68. doi:10.1177/15266028221095403 PMID: 35588222.
 25. Dong Z, Yang H, Li G, Xu X, Liu H, Gu J, et al. Preoperative Predictors of Late Aortic Expansion in Acute Type B Aortic Dissection Treated with TEVAR. *J Clin Med.* 2023 Apr;12(8). doi:10.3390/jcm12082826 PMID: 37109163.

26. Nakamura K, Kobayashi K, Nakai S, Sho R, Arai S, Ishizawa A, et al. Safe and favorable prognosis of thoracic endovascular aortic repair for the low-risk patients with non-acute type B aortic dissection. *Front Cardiovasc Med*. 2024 Oct 28;11:1442800. doi:10.3389/fcvm.2024.1442800
27. Noda K, Seike Y, Nishii T, Matsuda H. Thoracic endovascular aortic repair with collateral vessels from the femoral artery to Adamkiewicz's artery. *Interdiscip Cardiovasc Thorac Surg*. 2023 Jan 4;36(1):ivad006. doi:10.1093/icvts/ivad006 PMID: 36802260.
28. Bissacco D, de Kort JF, Ramella A, Allievi S, Bellotti P, Casana R, Domanin M, Migliavacca F, Trimarchi S. Discussing on the Aortic Coverage in Type B Aortic Dissection Treatment: A Comprehensive Scoping Review. *J Clin Med*. 2024 Jul 2;13(13):3897. doi:10.3390/jcm13133897 PMID: 38999462.
29. Bi J, Cui D, Liu Z, Wang J, Chen Y, Wang S, et al. Stent Graft-Induced High Wall Stress Promoted Aortic Wall Failure and Aortic Wall Injurious Complications After TEVAR: A Study of Numerical Simulation and Bioinformatics Analysis Based on Pig Models. *J Endovasc Ther*. 2026 Apr;33(2). doi:10.1177/15266028241283324 PMID: 39342458.
30. Xiang D, Chai B, Huang J, Liang H, Liang B, Zhao H, et al. The Impact of Oversizing in Thoracic Endovascular Aortic Repair on Long-Term Outcomes in Uncomplicated Type B Aortic Dissection: A Single-Center Retrospective Study. *J Endovasc Ther*. 2024 Oct;31(5):862–72. doi:10.1177/15266028231166282 PMID: 37078474.
31. Al-Rstum Z, Afifi RO. Retrograde aortic dissection during thoracic endovascular aortic repair: How to prevent and treat. *Journal of Vascular Surgery Cases, Innovations and Techniques*. 2024 Aug;10(4). doi:10.1016/j.jvscit.2024.101524
32. Liu X, Zhang L, Liu Z, Teng S. Optimizing Aortic Arch Stent-Graft Performance Through Material Science: An Exploratory Study. *Materials* 2025, Vol 18, Page 3592. 2025 Jul 31;18(15):3592. doi:10.3390/ma18153592
33. Shahbad R, Kuniyil S, Kamenskiy A, Zermeno E, Maleckis K, MacTaggart J, et al. Effect of stent-graft compliance on hemodynamics and aortic stiffening in an in vivo porcine study. *Acta Biomater*. 2026 Jan;209:408–25. doi:10.1016/j.actbio.2025.11.051 PMID: 41314447.
34. Girardin L, Stokes C, Thet MS, Oo AY, Balabani S, Díaz-Zuccarini V. Patient-Specific Haemodynamic Analysis of Virtual Grafting Strategies in Type-B Aortic Dissection: Impact of Compliance Mismatch. *Cardiovasc Eng Technol*. 2024 Jun;15(3):290–304. doi:10.1007/s13239-024-00713-6 PMID: 38438692.
35. Stonko DP, Edwards J, Abdou H, Treffalls RN, Walker P, DeMartino RR, et al. Thoracic Endovascular Aortic Repair Acutely Augments Left Ventricular Biomechanics in An Animal Model: A Mechanism for Postoperative Heart Failure and Hypertension. *Ann Vasc Surg*. 2023 Nov;97:18–26. doi:10.1016/j.avsg.2023.04.007 PMID: 37068623.
36. Bokobza De la Rosa MD, Jubouri M, Moothathamby T, Refaie M, Murtada A, Mohammed I, et al. Aortic and cardiovascular remodelling after thoracic endovascular aortic repair for blunt traumatic aortic injury in younger patients: A narrative review of physiological and clinical outcomes. *Exp Physiol*. 2025 Jan;111(1):43. doi:10.1113/EP092615 PMID: 40491037.
37. Skrypniuk D, Kalmykov E, Bischoff MS, Meisenbacher K, Klotz R, Hagedorn M, et al. Late Endograft Migration After Thoracic Endovascular Aortic Repair: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Endovascular Therapy*. 2024 Feb;31(1):7–18. doi:10.1177/15266028221109455 PMID: 35822261.
38. Awiwi MO, Kandemirli VB, Kokash D, Hossain F, Gjoni M, Odisio E, et al. Complications of thoracic endovascular aneurysm repair (TEVAR): A pictorial review. *Curr Probl Diagn Radiol*. 2024 Sep;53(5):648–61. doi:10.1067/j.cpradiol.2024.05.018 PMID: 38777715.
39. Armour CH, Guo B, Saitta S, Pirola S, Liu Y, Dong Z, et al. Patient-specific compliant simulation framework informed by 4DMRI-extracted pulse wave Velocity: Application post-TEVAR. *J Biomech*. 2024 Oct;175:112266. doi:10.1016/j.complbiomed.2021.105053 PMID: 34847383.
40. Gil-Sala D, Guala A, Garcia Reyes ME, Azancot MA, Dux-Santoy L, Allegue Allegue N, et al.

Geometric, Biomechanic and Haemodynamic Aortic Abnormalities Assessed by 4D Flow Cardiovascular Magnetic Resonance in Patients Treated by TEVAR Following Blunt Traumatic Thoracic Aortic Injury. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*. 2021 Nov;62(5):797–807. doi:10.1016/j.ejvs.2021.07.016 PMID: 34511317.

41. Van Bakel TMJ, Arthurs CJ, Nauta FJH, Eagle KA, Van Herwaarden JA, Moll FL, et al. Cardiac remodelling following thoracic endovascular aortic repair for descending aortic aneurysms. *Eur J Cardiothorac Surg*. 2019 Jun;55(6):1061–70. doi:10.1093/ejcts/ezy399 PMID: 30535179.