

# Malformaciones de la pared torácica: nuevas perspectivas en diagnóstico y tratamiento

M. Martínez-Ferro, L. Toselli, G. Bellía-Munzón

*Fundación Hospitalaria. Buenos Aires (Argentina).*

## INTRODUCCIÓN

La publicación del artículo original de Nuss y cols. en 1998, cambió definitivamente el tratamiento de las deformidades excavadas de la parrilla costal (PEX)<sup>(1)</sup>, pues esta revolucionaria técnica mínimamente invasiva brindó excelentes resultados inmediatos y a largo plazo. Como consecuencia, la técnica se popularizó y se afianzó como la mejor alternativa para corregir este tipo de deformidades, por lo que muchos pacientes, entusiasmados con los excelentes resultados, aceptaron ser corregidos mediante la misma.

Junto con el aumento del volumen de casos, aumentó también el número de artículos científicos dedicados al tema, la mayoría de ellos enfocados tanto en la fisiopatología de la deformidad como en mejoras técnicas orientadas a prevenir y/o disminuir las complicaciones inherentes al procedimiento quirúrgico<sup>(2-4)</sup>.

En esta puesta al día resumiremos los avances más importantes en cuanto al rol de la compresión cardíaca en la fisiopatología de la deformidad y también describiremos las modificaciones de la técnica que han colaborado en prevenir y/o disminuir complicaciones tales como la perforación cardíaca, el desplazamiento de los implantes, la corrección insuficiente y el dolor postoperatorio.

## LA COMPRESIÓN CARDIACA COMO PROTAGONISTA

Durante años, y hasta hoy, se argumentó que el PEX es un problema exclusivamente estético<sup>(5)</sup>. Esto se basaba en que la evidencia del impacto funcional de la patología no era

concluyente<sup>(6,7)</sup>. El problema de la intolerancia al ejercicio y la disnea que se observa en gran cantidad de pacientes con PEX no podía ser explicada solamente con los hallazgos encontrados en los test funcionales respiratorios<sup>(8-10)</sup>. Por otro lado, si bien la compresión cardíaca se observa claramente durante la reparación toracoscópica del PEX y podría explicar cabalmente los síntomas clínicos, los estudios ecocardiográficos habituales no suelen identificar patología alguna. Citando a Claude Bernard: “Quien no sabe lo que busca, no entiende lo que encuentra”, y la ecocardiografía convencional o, al menos, los operadores habituales, se encuentran entrenados para evaluar otro tipo de impacto cardíaco.

En esa línea, se han realizado estudios que evaluaron el impacto cardiovascular del PEX con distintas metodologías, incluyendo la ecocardiografía con y sin esfuerzo, la ecocardiografía transesofágica, la resonancia magnética cardíaca (RMC) y pruebas cardiopulmonares.

Con el paso del tiempo, la evidencia que demuestra que el PEX comprime el corazón, sobre todo sus cavidades derechas, y que esto genera repercusión funcional, se ha incrementado. Se ha encontrado una relación entre la severidad del PEX y la disminución del gasto cardíaco en un estudio con 99 pacientes evaluados con resonancia y prueba de esfuerzo cardiopulmonar<sup>(11)</sup>.

Además, algunos estudios demostraron la reversión de la compresión cardíaca luego de la reparación del PEX con métodos de imagen como el ecocardiograma transesofágico intraoperatorio<sup>(12-14)</sup>, y se ha logrado evidenciar el aumento de la fracción de eyección del VD a un año posterior a la cirugía<sup>(15)</sup>.

En cuanto a las pruebas cardiopulmonares, se ha evidenciado mejoría en sus resultados luego de la reparación del PEX tanto en niños como en adultos<sup>(9,16)</sup>.

La RMC ha sido utilizada en estudios que exploran la disfunción cardíaca en PEX, en parte promovida por el hecho de no presentar las limitaciones de ventana ultrasónica subóptima que afectan el ecocardiograma en un porcentaje no despreciable de estos pacientes<sup>(17-20)</sup>. Utilizando la RMC, se ha descrito una clasificación del grado de compresión

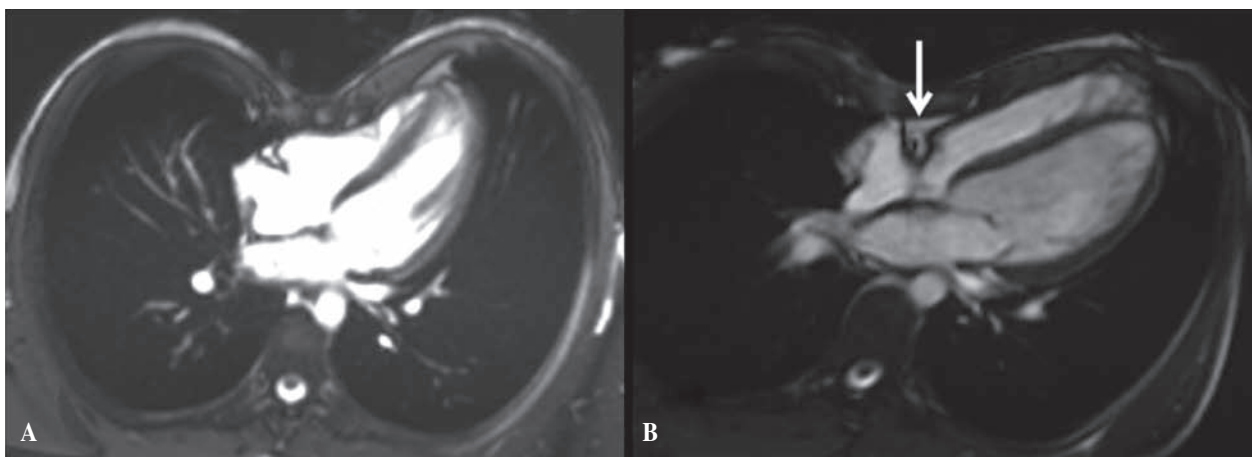
---

**Correspondencia:** Dr. Marcelo Martínez-Ferro.

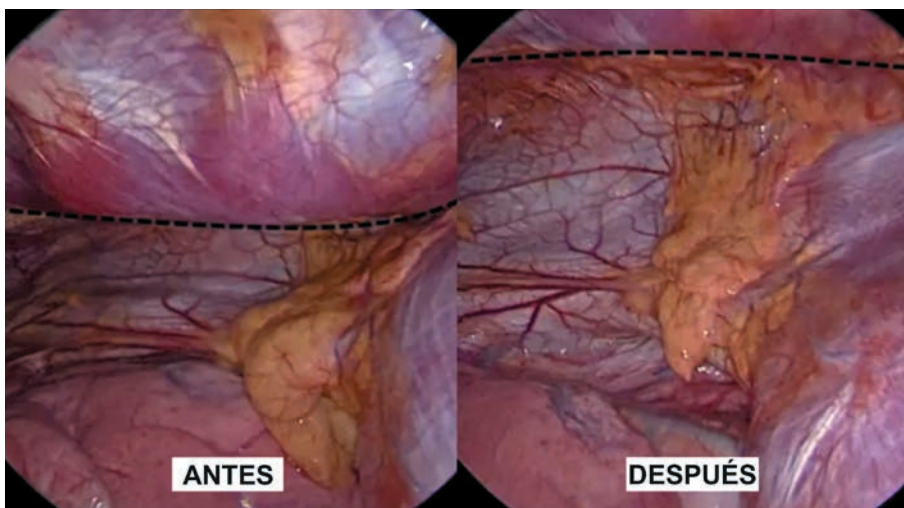
E-mail: m.martinezferro@gmail.com

Recibido: Julio 2021

Aceptado: Julio 2021



**Figura 1.** RMC de dos casos de PEX con compresión cardíaca. En A puede observarse que la compresión se limita a la pared libre del ventrículo derecho (tipo 1); en cambio, en B, el surco auriculoventricular (flecha) también se encuentra comprometido (tipo 2).



**Figura 2.** Visión toracoscópica de la relación entre esternón y corazón durante una toracoplastia de Nuss. Nótese a la izquierda la línea punteada delineando la cara interna del esternón comprimiendo el corazón antes de la elevación esternal y, a la derecha, luego de la elevación esternal, la línea separada creándose un espacio real de seguridad para la disección precardiaca.

cardíaca en reposo en tres grupos: tipo 0 (sin compresión), tipo 1 (compresión del VD) y tipo 2 (compresión del VD y del surco auriculoventricular) (Fig. 1). En este estudio que incluyó a 60 pacientes, el 77% presentó compresión del VD, siendo más frecuente la compresión tipo 1 (45%)<sup>(21)</sup>. *A posteriori*, aplicando esta clasificación, se estudiaron las RMC, ecocardiografías en estrés y tomografías de tórax de 59 pacientes observando que a mayor grado de compresión por RMC, mayor disfunción diastólica del ventrículo derecho y que el grado de compresión se relacionaba con los índices de severidad del PEX<sup>(22)</sup>. En una serie de 269 pacientes con PEX estudiados con ecocardiografía de estrés, la más extensa hasta el momento, se evidenció que el 64% presentaban movimiento septal anormal, un 29% disfunción diastólica del VD y un 16% disfunción sistólica del VD<sup>(23)</sup>.

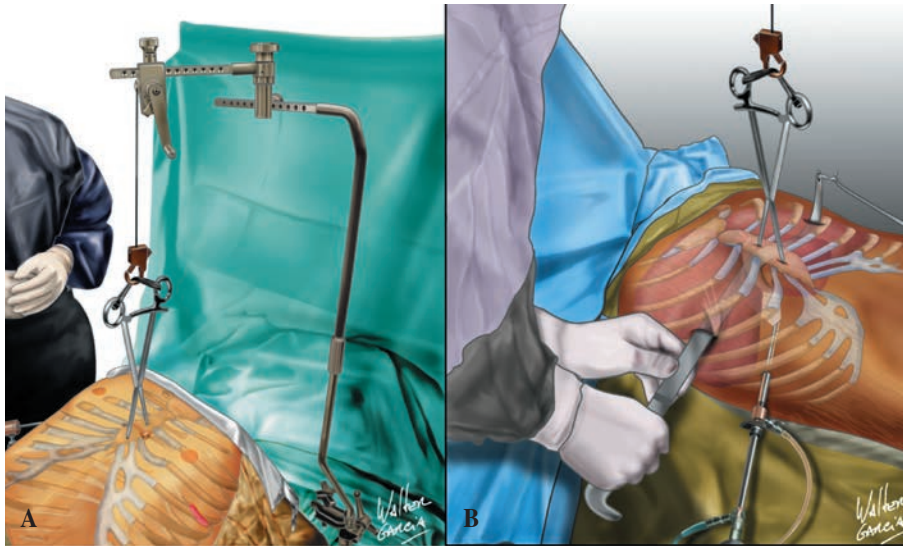
En resumen, si bien el rol del aparato respiratorio y muscular no debe ser subestimado, el papel de la compresión car-

diaca ha sido claramente respaldado por la evidencia y se ha convertido en un nuevo objetivo quirúrgico al reparar el PEX.

### LA REPARACIÓN MÍNIMAMENTE INVASIVA DEL PEX YA NO ES UNA CIRUGÍA PELIGROSA

Ante el reporte de complicaciones asociadas a la técnica de Nuss<sup>(2-4,24-28)</sup>, algunos centros implementaron modificaciones a la técnica original<sup>(29-31)</sup>, tales como la visualización toracoscópica, la disección subxifoidea retroesternal y la elevación esternal.

Esta última es para los autores la modificación más importante, ya que permite crear un plano de disección entre la cara posterior del esternón y el corazón, disminuyendo la posibilidad de perforación cardíaca (Fig. 2). Además, con la elevación esternal se produce una “corrección temporaria del defecto”,



**Figura 3.** A) Se esquematiza la elevación esternal con una grúa Rultract y una pinza de Lewin colocada en sentido longitudinal al esternón en un paciente con *pectus excavatum* durante la reparación. B) Una vez elevado el esternón, se puede observar el pasaje de un “samurái” o *pectus introducer* para realizar la disección del espacio retroesternal y facilitar el pasaje del implante.

lo que evita que el defecto sea corregido al momento de pasar el instrumental originalmente denominado *pectus introducer*, al que localmente llamamos “sable” o “samurái” (Fig. 3A y B). Antes de la implementación de la elevación esternal era muy común el desgarramiento de los músculos intercostales debido a la fuerza considerable que había que hacer con el mismo al pasarlo de lado a lado. Gracias a la elevación esternal, esta complicación ha desaparecido por completo en nuestra práctica.

La modalidad de elevación esternal varía según los diferentes grupos quirúrgicos. Schier<sup>(32)</sup> describió la utilización de una campana de vacío; Jaroszewski, un elevador denominado Rultract con la utilización de un clamp de Lewin (*Lewin Spinal Perforating Forceps*)<sup>(33,34)</sup>, y Park, la utilización de una grúa montada a la mesa de operaciones conectada con una sutura de alambre fijada al esternón<sup>(35)</sup>, aunque, recientemente, publicaron la elevación esternal utilizando un tornillo en vez de la sutura de alambre<sup>(36)</sup>.

Otra complicación mayor es el desplazamiento de los implantes, ya sea por rotación, desplazamiento lateral o hundimiento<sup>(2,4)</sup>. Si bien el desplazamiento puede generar la necesidad de una reoperación, la rotación implica un riesgo de lesión de estructuras vitales como los grandes vasos, siendo sus consecuencias fatales<sup>(26)</sup>. Para evitar el movimiento de los implantes se incorporó el uso de estabilizadores laterales a la técnica original<sup>(29)</sup>. Muchos grupos utilizan estabilizadores uni o bilaterales fijados a las costillas con alambre<sup>(29)</sup>, sin embargo varias publicaciones siguen reportando el desplazamiento de implantes y rotura de los alambres<sup>(37-40)</sup>.

Buscando disminuir al máximo el riesgo de rotación y desplazamiento, Park<sup>(41)</sup> describió la colocación de puentes laterales en 80 pacientes con una media de 17,5 años (rango de 6 a 38 años), y con un 100% de efectividad. Siguiendo los conceptos de Park, recientemente hemos publicado nuestra experiencia utilizando un sistema de puentes autobloqueantes desde 2016<sup>(42)</sup>. Como ventaja accesoria, el uso de puentes

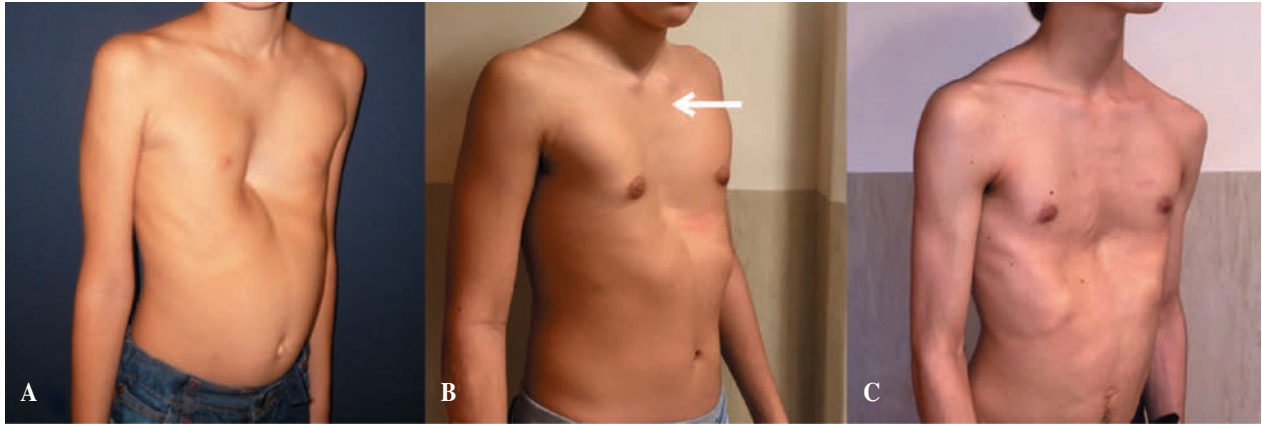
evita la fijación de los implantes a las costillas y a la pared muscular e impiden por completo la rotación axial y lateral de los implantes. En el caso de utilizar implantes cruzados, este sistema se compone de una variedad completa de puentes curvos que se adaptan a todas las configuraciones de los implantes, según el caso.

### REMODELACIÓN TORÁCICA COMPLETA VERSUS CORRECCIÓN DEL PUNTO MÁS HUNDIDO

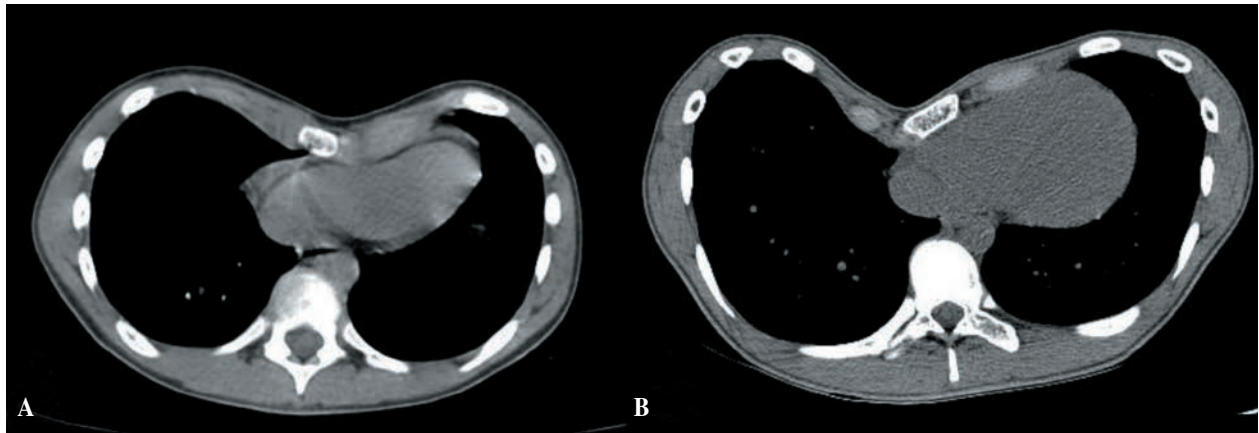
Tanto la descripción original de la reparación mínimamente invasiva del PEX (MIRPE) como el índice de Haller<sup>(43)</sup> se han enfocado en el punto de mayor depresión de la excavación de la parrilla costal para definir el diagnóstico y la severidad de la deformidad. Sin embargo, como se observa en la clasificación propuesta por Kelly y cols.<sup>(44)</sup>, la presentación clínica del PEX es muy heterogénea (Fig. 4), por lo que se han descrito otros índices, tales como el “índice de corrección” (contempla la distancia entre la línea costal anterior y el punto de mayor hundimiento de la pared costal)<sup>(45)</sup> y el “índice Titanic”<sup>(42)</sup> (porcentaje del esternón ubicado por detrás de la línea costal anterior).

Además, el tórax puede ser simétrico o asimétrico, lo que determina el moldeado de los implantes y su punto de ingreso y egreso al tórax<sup>(46)</sup> (Fig. 5).

Al valorar la morfología de superficie con escáner óptico antes y después del MIRPE se evidencia una remodelación completa de la caja torácica, con aumento de los diámetros torácicos transversal y anteroposterior (a expensas de la horizontalización de las costillas). Además, pueden observarse otras modificaciones favorables en la postura del paciente, como una disminución de la antepulsión de los hombros, la cifosis dorsal y la anteriorización de la cabeza (Fig. 6).



**Figura 4.** Se observan tres pacientes con deformidad excavada del tórax de distinto tipo. A) Deformidad tipo “punch” severo. B) Deformidad tipo “gran cañón”. Nótese que el hundimiento comienza en el tercio superior del esternón (flecha). C) Deformidad tipo “plato”, en el que toda la cara anterior de la pared costal se encuentra aplanada. Estos pacientes suelen presentar asociación de restricción ventilatoria y compresión cardíaca.



**Figura 5.** La simetría de la pared costal debe ser considerada al diseñar los implantes retroesternales en un caso de PEX. Nótese la marcada diferencia entre (A) un paciente simétrico, y (B) un paciente asimétrico con PEX.

Estrategias tales como la técnica de sándwich (que permite corregir mediante una prensa de implantes intra y extratorácicos las deformidades asimétricas muy rígidas), el *magic string* (para aplanar las protrusiones de la pared anterior del tórax) y el *flare buster* (que moldea los alerones costales asociados)<sup>(47)</sup> pueden complementar al MIRPE con excelente resultados.

En resumen, consideramos que el objetivo de la reparación del PEX debe ser la remodelación torácica completa y no simplemente la reparación del sitio más deprimido del tórax. Esto influye directamente en la determinación de la forma, longitud, ubicación y cantidad de implantes a colocar y requiere un abordaje personalizado de cada caso.

Recientemente publicamos el proceso perioperatorio personalizado de 130 pacientes quirúrgicos con PEX. El mismo incluye el planeamiento prequirúrgico basado en la reconstrucción tomográfica tridimensional del tórax, la prueba

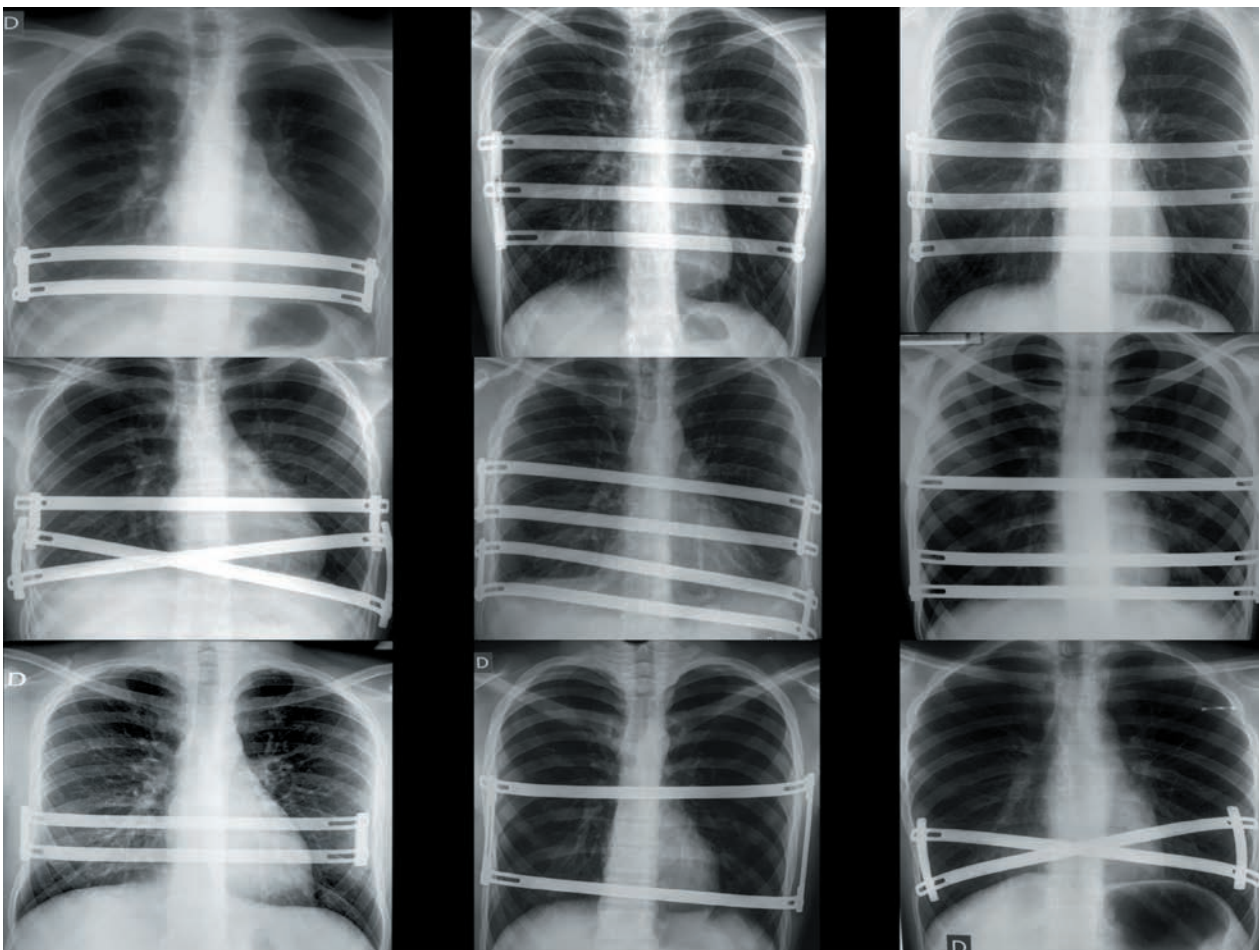
preoperatoria de plantillas a medida diseñadas en forma semiautomática y la customización de los implantes<sup>(42)</sup>. Hemos realizado la reparación de pacientes con una gran variedad de presentaciones clínicas utilizando este proceso, que ha demostrado su consistencia en el tiempo (Fig. 7). Más aún, hemos aplicado estos conceptos en pacientes con malformaciones complejas de la pared torácica tales como pectus arcuatum o síndrome de Poland<sup>(48)</sup> (Fig. 8).

### **CRIOANALGESIA PARA EL MANEJO DEL DOLOR POSTOPERATORIO: YA NO ES UNA CIRUGÍA DOLOROSA**

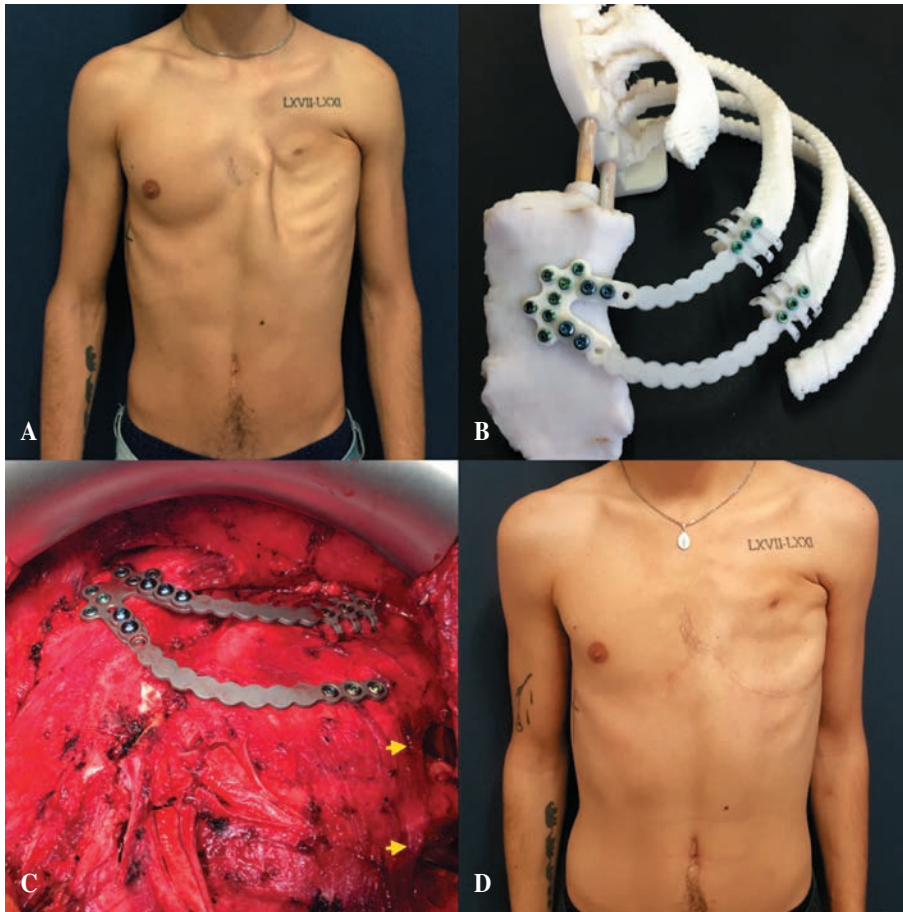
Un efecto no deseado de la técnica de MIRPE es el dolor postoperatorio, que requiere la administración de opioides a altas dosis y prolonga la internación hospitalaria por varios



**Figura 6.** En el A, un paciente con PEX parado de perfil en el que se observa la típica cifosis dorsal, antepulsión de hombros y cabeza adelantada. En B, el mismo paciente, dos años después de una toracoplastia con tres implantes retroesternales. Nótese la corrección de la postura con resolución de la cifosis y alineamiento de cabeza y hombros.



**Figura 7.** Se observa una gran gama de posibilidades en el número y localización de implantes y puentes laterales. La heterogeneidad de las deformidades de la pared torácica requiere diferentes tipos de prótesis y el planeamiento preoperatorio es esencial para un resultado óptimo. Reimpreso de *The Journal of Pediatric Surgery*, vol. 55(12), Bellía-Munzón G, Martínez J, Toselli L, y cols. From bench to bedside: 3D reconstruction and printing as a valuable tool for the chest wall surgeon, páginas: 2703-2709, 2020, con permiso de Elsevier.



**Figura 8.** Proceso de simulación usando tecnología tridimensional y reparación híbrida con prótesis customizadas de un síndrome de Poland complejo. A) Se evidencia el aspecto preoperatorio del pecho del paciente con síndrome de Poland con agenesia parcial del esternón, agenesia condral e hipoplasia costal. B) Simulación de la reparación utilizando un modelo impreso en 3D con una escala 1:1. C) Una fotografía intraoperatoria demuestra el campo quirúrgico con costillas de titanio con agarre costal. La costilla inferior no posee agarre costal porque fue considerado innecesario durante la simulación. Dos cabezas de flecha marcan dos implantes retroesternales emergiendo del tórax en el lado izquierdo. D) Se observa el aspecto del paciente dos años después de la cirugía. Reimpreso de *The Annals of Thoracic Surgery*, journal pre-proof, Martínez J, Toselli L, Giménez Aleixandre Cristina, y cols. Surgical Planning, Simulation, and prostheses customization for complex chest wall malformations, con permiso de Elsevier.

días. Se han publicado distintas estrategias para su manejo, que incluyen la anestesia epidural, el bloqueo intercostal, analgesia controlada por el paciente<sup>(49-54)</sup>.

Los primeros reportes del uso de la crioanalgesia para control del dolor postoperatorio en PEX evidenciaron un menor requerimiento de opioides y una disminución marcada de la estadía hospitalaria, generando un gran interés en los grupos que operan deformidades torácicas<sup>(55-59)</sup>. En 2016, Keller y cols. publicaron un estudio retrospectivo comparativo, incluyendo 26 pacientes sometidos a crioanalgesia intercostal durante MIRPE y 26 pacientes sometidos a anestesia epidural que reveló que el grupo con crioanalgesia tenía una disminución significativa de la estadía hospitalaria ( $3,5 \pm 0,83$  días *versus*  $5,79 \pm 0,93$  días,  $p < 0,001$ ) y del requerimiento de narcóticos intravenosos ( $49,0 \text{ mg} \pm 32,7$  *versus*  $119,8 \text{ mg} \pm 95,1$ ,  $p = 0,0011$ )<sup>(56)</sup>. En 2019 este hallazgo se confirmó en un estudio randomizado entre dos grupos de 10 pacientes cada uno sometidos a MIRPE, uno con crioanalgesia y otro con anestesia epidural, que reportó una reducción mediana de la estadía hospitalaria de cinco a tres días utilizando crioanalgesia (Mann-Whitney U,  $p = 0,0001$ ) y una reducción significativa del requerimiento de opioides del 52-82% los primeros tres días postoperatorios ( $p < 0,01$  cada día)<sup>(55)</sup>.

La crioanalgesia consiste en la aplicación de frío para lograr la axonotmesis, es decir, la destrucción del axón y de la

cubierta de mielina de un nervio periférico con preservación de las vainas conectivas. La destrucción nerviosa se produce en el trayecto expuesto a la aplicación de frío, generalmente entre  $-60$  y  $-80$  °C (Fig. 9). A partir de los extremos seccionados del nervio se produce su regeneración a lo largo de las vainas conectivas restaurándose *ad integrum* en el término de alrededor de seis semanas (congelando 2 cm de longitud).

Si bien no es uniforme, es frecuente la indicación de pregabalina o gabapentin pre y postoperatorio para prevenir la aparición de dolor neuropático. Sin embargo, un estudio reciente evaluó la incidencia de dolor neuropático en 30 menores de 21 años y 13 mayores sometidos a crioanalgesia durante MIRPE sin medicación preventiva, y observaron dolor neuropático solo en tres adultos, postulando que hacen falta más estudios para explorar si este efecto adverso se presenta en pacientes jóvenes<sup>(60)</sup>.

El abordaje puede ser intratorácico en el mismo momento operatorio o percutáneo en un procedimiento simultáneo o previo, no habiéndose demostrado aún el beneficio de una estrategia sobre otra.

Recientemente, los autores publicaron una cohorte de 23 pacientes sometidos a crioanalgesia durante MIRPE entre septiembre de 2018 y abril de 2019, con una estadía hospitalaria media de  $1,64 \pm 0,73$  días<sup>(61)</sup>.



**Figura 9.** Durante la crioanalgesia intratorácica es clave elegir el punto adecuado de ingreso de la sonda de crioanalgesia para poder alcanzar adecuadamente todos los espacios intercostales objetivo. Obsérvese en la visión toracoscópica intratorácica que la punta angulada de la sonda se apoya paralelamente a la cara inferior de la costilla superior.

La crioanalgesia es probablemente la mejor estrategia para manejo de dolor postoperatorio y creemos que su uso aumentará en vista de su alta tasa de éxito.

## CONCLUSIONES

En esta puesta al día resumimos los avances más relevantes en relación con las deformidades excavadas del tórax. Entre ellas se incluyen el rol de la compresión cardíaca en la fisiopatología del PEX, la disminución de las complicaciones que conlleva la utilización de elevación esternal, la necesidad de lograr una remodelación torácica completa con el tratamiento y la incorporación de la crioanalgesia para el manejo del dolor postoperatorio.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Nuss D, Kelly RE, Croitoru DP, Katz ME. A 10-year review of a minimally invasive technique for the correction of pectus excavatum. *J Pediatr Surg.* 1998; 33(4): 545-52.
2. Hebra A, Kelly RE, Ferro MM, Yüksel M, Campos JRM, Nuss D. Life-threatening complications and mortality of minimally invasive pectus surgery. *J Pediatr Surg.* 2018; 53(4): 728-32.
3. Goretsky MJ, McGuire MM. Complications associated with the minimally invasive repair of pectus excavatum. *Semin Pediatr Surg.* 2018; 27(3): 151-5.
4. Hebra A. Minor and Major Complications Related to Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum. *Eur J Pediatr Surg.* 2018; 28(4): 320-6.
5. Faglin P, Nectoux, Belkhou A, Guerreschi P, Duquennoy-Martinot V. The unsightly chest: Analysis and anomaly. Curative or palliative approach? *Ann Chir Plast Esthet.* 2016; 61(5): 680-93.
6. Guntheroth WG, Spiers PS. Cardiac Function Before and After Surgery for Pectus Excavatum. *Am J Cardiol.* 2007; 99(12): 1762-4.
7. Malek MH, Berger DE, Marelich WD, Coburn JW, Beck TW, Housh TJ. Pulmonary function following surgical repair of pectus excavatum: a meta-analysis. *Eur J Cardio-thoracic Surg.* 2006; 30(4): 637-43.
8. Swanson JW, Avansino JR, Phillips GS, Yung D, Whitlock KB, Redding GJ, et al. Correlating Haller Index and cardiopulmonary disease in pectus excavatum. *Am J Surg.* 2012; 203(5): 660-4.

9. Tang M, Nielsen HHM, Lesbo M, Frøkiær J, Maagaard M, Pilegaard HK, et al. Improved cardiopulmonary exercise function after modified Nuss operation for pectus excavatum. *Eur J Cardio-thoracic Surg.* 2012; 41(5): 1063-7.
10. Tardy-Médous MM, Filaire M, Patoir A, Gautier-Pignonblanc P, Galvaing G, Kwiatkowski F, et al. Exercise Cardiac Output Limitation in Pectus Excavatum. *J Am Coll Cardiol.* 2015; 66(8): 976-7.
11. Abu-Tair T, Turial S, Hess M, Wiethoff CM, Staatz G, Lollert A, et al. Impact of Pectus Excavatum on Cardiopulmonary Function. *Ann Thorac Surg.* 2018; 105(2): 455-60.
12. Chao CJ, Jaroszewski D, Gotway M, Ewais MA, Wilansky S, Lester S, et al. Effects of Pectus Excavatum Repair on Right and Left Ventricular Strain. *Ann Thorac Surg.* 2018; 105(1): 294-301.
13. Coln E, Carrasco J, Coln D. Demonstrating relief of cardiac compression with the Nuss minimally invasive repair for pectus excavatum. *J Pediatr Surg.* 2006; 41(4): 683-6.
14. Laín A, Giralt G, Giné C, García Martínez L, Villaverde I, López M. Transesophageal echocardiography during pectus excavatum correction in children: What happens to the heart? *J Pediatr Surg.* 2021; 56(5): 988-94.
15. Töpfer A, Polleichtner S, Zagrosek A, Prothmann M, Traber J, Schwenke C, et al. Impact of surgical correction of pectus excavatum on cardiac function: Insights on the right ventricle. A cardiovascular magnetic resonance study. *Interact Cardiovasc Thorac Surg.* 2016; 22(1): 38-46.
16. Das BB, Recto MR, Yeh T. Improvement of cardiopulmonary function after minimally invasive surgical repair of pectus excavatum (Nuss procedure) in children. *Ann Pediatr Cardiol.* 2019; 12(2): 77-82.
17. Saleh RS, Finn JP, Fenchel M, Moghadam A, Krishnam M, Abrazaado M, et al. Cardiovascular magnetic resonance in patients with pectus excavatum compared with normal controls. *J Cardiovasc Magn Reson.* 2010; 12(1): 1-10.
18. Lollert A, Emrich T, Eichstädt J, Kampmann C, Abu-Tair T, Turial S, et al. Differences in myocardial strain between pectus excavatum patients and healthy subjects assessed by cardiac MRI: a pilot study. *Eur Radiol.* 2018; 28(3): 1276-84.
19. Dore M, Triana Junco P, Bret M, Gómez Cervantes M, Muñoz Romo M, Jiménez Gómez J, et al. Advantages of Cardiac Magnetic Resonance Imaging for Severe Pectus Excavatum Assessment in Children. *Eur J Pediatr Surg.* 2018; 28(1): 34-8.
20. Oezcan S, Attenhofer Jost CH, Pfyffer M, Kellenberger C, Jenni R, Binggeli C, et al. Pectus excavatum: Echocardiography and cardiac MRI reveal frequent pericardial effusion and right-sided heart anomalies. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2012; 13(8): 673-9.
21. Deviggiano A, Carrascosa P, Vallejos J, Bellía-Munzón G, Vina N, Rodríguez-Granillo GA, et al. Relationship between cardiac MR compression classification and CT chest wall indexes in patients with pectus excavatum. *J Pediatr Surg.* 2018; 53(11): 2294-8.
22. Rodríguez-Granillo GA, Raggio IM, Deviggiano A, Bellía-Munzón G, Capunay C, Nazar M, et al. Impact of pectus excavatum on cardiac morphology and function according to the site of maximum compression: effect of physical exertion and respiratory cycle. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging.* 2020; 21(1): 77-84.
23. Raggio IM, Martínez-Ferro M, Bellía-Munzón G, Capunay C, Munín M, Toselli L, et al. Diastolic and Systolic Cardiac Dysfunction in Pectus Excavatum: Relationship to Exercise and Malformation Severity. *Radiol Cardiothorac Imaging.* 2020; 2(5): e200011.
24. Kelly RE, Obermeyer RJ, Goretsky MJ, Kuhn MA, Frantz FW, McGuire MM, et al. Recent Modifications of the Nuss Procedure. *Ann Surg.* 2020; Publish Ah(Xx): 1-7. DOI: 10.1097/sla.0000000000003877.
25. Moss RL, Albanese CT, Reynolds M. Major complications after minimally invasive repair of pectus excavatum: Case reports. *J Pediatr Surg.* 2001; 36(1): 155-8.
26. Hoel TN, Rein KA, Svennevig JL. A life-threatening complication of the nuss-procedure for pectus excavatum. *Ann Thorac Surg.* 2006; 81(1): 370-2.
27. Castellani C, Schalamon J, Saxena AK, Höellwarth ME. Early complications of the Nuss procedure for pectus excavatum: a prospective study. *Pediatr Surg Int.* 2008; 24(6): 659-66.
28. Gips H, Zaitsev K, Hiss J. Cardiac perforation by a pectus bar after surgical correction of pectus excavatum: Case report and review of the literature. *Pediatr Surg Int.* 2008; 24(5): 617-20.
29. Croitoru DP, Kelly RE, Goretsky MJ, Lawson ML, Swoveland B, Nuss D. Experience and modification update for the minimally invasive Nuss technique for pectus excavatum repair in 303 patients. *J Pediatr Surg.* 2002; 37(3): 437-45.
30. Kelly RE, Obermeyer RJ, Goretsky MJ, Kuhn MA, Frantz FW, McGuire MM, et al. Recent Modifications of the Nuss Procedure: The Pursuit of Safety During the Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum. *Ann Surg.* 2020; Publish Ah(Xx): 1-7.
31. Notrica DM. Modifications to the Nuss procedure for pectus excavatum repair: A 20-year review. *Semin Pediatr Surg.* 2018; 27(3): 133-50.
32. Schier F, Bahr M, Klobe E. The vacuum chest wall lifter: An innovative, nonsurgical addition to the management of pectus excavatum. *J Pediatr Surg.* 2005; 40(3): 496-500.
33. Jaroszewski DE. Forced mechanical sternal elevation for nuss repair. *Ann Thorac Surg.* 2013; 96(5): 1914.
34. Jaroszewski DE, Johnson K, McMahon L, Notrica D. Sternal elevation before passing bars: A technique for improving visualization and facilitating minimally invasive pectus excavatum repair in adult patients. *J Thorac Cardiovasc Surg.* 2014; 147(3): 1093-5.
35. Park HJ, Chung WJ, Lee IS, Kim KT. Mechanism of bar displacement and corresponding bar fixation techniques in minimally invasive repair of pectus excavatum. *J Pediatr Surg.* 2008; 43(1): 74-8.
36. Park HJ, Rim G. Development of a Screw-Crane System for Pre-Lifting the Sternal Depression in Pectus Excavatum Repair: A Test of Mechanical Properties for the Feasibility of a New Concept. *J Chest Surg.* 2021; 54(3): 186-90.
37. Zhang Y, Chen Q, Luo Y, Sun C, Chen M, Wu N, et al. Wire fracture in postoperative Nuss procedure: a problem that cannot be ignored. *Transl Pediatr.* 2021; 10(3): 569-78.
38. Kelly RE, Mellins RB, Shamberger RC, Mitchell KK, Lawson ML, Oldham KT, et al. Multicenter study of pectus excavatum, final report: Complications, static/exercise pulmonary function, and anatomic outcomes. *J Am Coll Surg.* 2013; 217(6): 1080-9.
39. Tedde ML, de Campos JRM, Das-Neves-Pereira JC, Abrão FC, Jatene FB. The search for stability: Bar displacement in three series of pectus excavatum patients treated with the Nuss technique. *Clinics.* 2011; 66(10): 1743-6.
40. Hebra A, Swoveland B, Egbert M, Tagge EP, Georgeson K, Othersen HB, et al. Outcome analysis of minimally invasive repair of pectus excavatum: Review of 251 cases. *J Pediatr Surg.* 2000; 35(2): 252-8.



41. Park HJ, Kim KS, Moon YK, Lee S. The bridge technique for pectus bar fixation: A method to make the bar un-rotatable. *J Pediatr Surg.* 2015; 50(8): 1320-2.
42. Bellía-Munzón G, Martínez J, Toselli L, Nazar Peirano M, Sanjurjo D, Vallee M, et al. From bench to bedside: 3D reconstruction and printing as a valuable tool for the chest wall surgeon. *J Pediatr Surg.* 2020; 55(12): 2703-9.
43. Haller JAJ, Kramer SS, Lietman SA. Use of CT scans in selection of patients for pectus excavatum surgery: a preliminary report. *J Pediatr Surg.* 1987; 10(10): 904-6.
44. Kelly RE, Quinn A, Varela P, Redlinger RE, Nuss D. Dismorfología de las deformidades de la pared torácica: distribución de frecuencias de los subtipos de pectus excavatum típico y subtipos poco comunes. *Arch Bronconeumol.* 2013; 49(5): 196-200.
45. St. Peter SD, Juang D, Garey CL, Laituri CA, Ostlie DJ, Sharp RJ, et al. A novel measure for pectus excavatum: The correction index. *J Pediatr Surg.* 2011; 46(12): 2270-3.
46. Ben XS, Deng C, Tian D, Tang JM, Xie L, Ye X, et al. Multiple-bar Nuss operation: An individualized treatment scheme for patients with significantly asymmetric pectus excavatum. *J Thorac Dis.* 2020; 12(3): 949-55.
47. Park HJ, Kim KS. The sandwich technique for repair of pectus carinatum and excavatum/carinatum complex. *Ann Cardiothorac Surg.* 2016; 5(5): 434-9.
48. Martinez J, Toselli L, Aleixandre CG, Bellía-Munzón G, Sanjurjo D, Peirano MN, et al. Surgical planning, simulation, and prostheses customization for complex chest wall malformations. *Ann Thorac Surg.* 2021; Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003497521005099>
49. Thaker S, McKenna E, Rader C, Misra M V. Pain Management in Pectus Excavatum Surgery: A Comparison of Subcutaneous Catheters Versus Epidurals in a Pediatric Population. *J Laparoendosc Adv Surg Tech.* 2019; 29(2): 261-6.
50. Hall Burton DM, Boretsky KR. A comparison of paravertebral nerve block catheters and thoracic epidural catheters for postoperative analgesia following the Nuss procedure for pectus excavatum repair. *Paediatr Anaesth.* 2014; 24(5): 516-20.
51. St. Peter SD, Weesner KA, Weissend EE, Sharp SW, Valusek PA, Sharp RJ, et al. Epidural vs patient-controlled analgesia for postoperative pain after pectus excavatum repair: A prospective, randomized trial. *J Pediatr Surg.* 2012; 47(1): 148-53.
52. Stroud AM, Tulanont DD, Coates TE, Goodney PP, Croitoru DP. Epidural analgesia versus intravenous patient-controlled analgesia following minimally invasive pectus excavatum repair: A systematic review and meta-analysis. *J Pediatr Surg.* 2014; 49(5): 798-806.
53. Sujka JA, Dekonenko C, Millsbaugh DL, Doyle NM, Walker BJ, Leys CM, et al. Epidural versus PCA Pain Management after Pectus Excavatum Repair: A Multi-Institutional Prospective Randomized Trial. *Eur J Pediatr Surg.* 2020; 30(5): 465-71.
54. Dettterbeck FC. Efficacy of methods of intercostal nerve blockade for pain relief after thoracotomy. *Ann Thorac Surg.* 2005; 80(4): 1550-9.
55. Graves CE, Moyer J, Zobel MJ, Mora R, Smith D, O'Day M, et al. Intraoperative intercostal nerve cryoablation During the Nuss procedure reduces length of stay and opioid requirement: A randomized clinical trial. *J Pediatr Surg.* 2019; 54(11): 2250-6.
56. Keller BA, Kabagambe SK, Becker JC, Chen YJ, Goodman LF, Clark-Wronski JM, et al. Intercostal nerve cryoablation versus thoracic epidural catheters for postoperative analgesia following pectus excavatum repair: Preliminary outcomes in twenty-six cryoablation patients. *J Pediatr Surg.* 2016; 51(12): 2033-8.
57. Harbaugh CM, Johnson KN, Kein CE, Jarboe MD, Hirschl RB, Geiger JD, et al. Comparing outcomes with thoracic epidural and intercostal nerve cryoablation after Nuss procedure. *J Surg Res.* 2018; 231(734): 217-23.
58. Dekonenko C, Dorman RM, Duran Y, Juang D, Aguayo P, Fraser JD, et al. Postoperative pain control modalities for pectus excavatum repair: A prospective observational study of cryoablation compared to results of a randomized trial of epidural vs patient-controlled analgesia. *J Pediatr Surg.* 2020; 55(8): 1444-7.
59. Rettig RL, Rudikoff AG, Lo HYA, Shaul DB, Banzali FM, Conte AH, et al. Cryoablation is associated with shorter length of stay and reduced opioid use in pectus excavatum repair. *Pediatr Surg Int.* 2020; 37(1): 67-75.
60. Zobel MJ, Ewbank C, Mora R, Idowu O, Kim S, Padilla BE. The incidence of neuropathic pain after intercostal cryoablation during the Nuss procedure. *Pediatr Surg Int.* 2020; 36(3): 317-24.
61. Cadaval Gallardo C, Martínez J, Bellía-Munzón G, Nazar M, Sanjurjo D, Toselli L, et al. Thoracoscopic cryoanalgesia: A new strategy for postoperative pain control in minimally invasive pectus excavatum repair. *Cir Pediatr.* 2020; 33(1): 11-5.