

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
PROGRAMA DE POSGRADO EN ESPECIALIDADES MÉDICAS

PROPUESTA DE PROTOCOLO ANALGÉSICO MULTIMODAL CON  
IMPLEMENTACIÓN DE CRIOANALGESIA PARA PACIENTES SOMETIDOS  
A TÉCNICA DE NUSS EN EL HOSPITAL CALDERÓN GUARDIA

Trabajo Final de Graduación sometido a la consideración del Comité de la  
Especialidad en Anestesiología y Recuperación para optar por el grado y título de  
Especialista en Anestesiología y Recuperación

VALERIE QUESADA VARGAS

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2026

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la dicha de dedicarme a lo que amo.

A mi familia, por caminar conmigo cada paso de este viaje.

A mi esposo, mi pilar incondicional, quien me sostuvo con fortaleza en los momentos más difíciles.

A mis profesores, por mostrarme la belleza de esta profesión que tanto me inspira.

Y a mis amadas mascotas, por su compañía fiel en cada desvelo y cada amanecer.

## HOJA DE APROBACIÓN DEL COMITÉ ASESOR


Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por la Subcomisión de la Especialidad en Anestesiología y Recuperación del Programa de Posgrado en Especialidades Médicas de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Especialista en Anestesiología y Recuperación

ALEJANDRO  
HIDALGO  
DELFINO (FIRMA)

Digitally signed by  
ALEJANDRO HIDALGO  
DELFINO (FIRMA)  
Date: 2026.04.06  
19:22:42 -06'00'

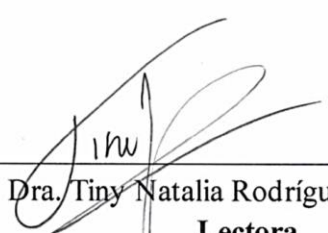
---

Dr. Alejandro Hidalgo Delfino  
**Coordinador o representante del Posgrado**




---

Dra. Ariana Paola Corella Fallas  
**Tutora**



---

Dra. Tiny Natalia Rodríguez Aragonés  
**Lectora**



---

Valerie Quesada Vargas  
**Sustentante**

## CARTA DE REVISIÓN FILOLÓGICA

San José, 14 de diciembre de 2025

Señores(as)  
Programa de Posgrado en Especialidades Médicas  
Sistema de Estudios de Posgrado  
Universidad de Costa Rica

Estimados señores(as):

Yo, María Fernanda Sanabria Coto, cédula de identidad 114290780, filóloga española graduada en la Universidad de Costa Rica, perteneciente a la Asociación Costarricense de Filólogos (ACFIL), carné 225 y al Colegio de Licenciados y Profesores en Letras, Filosofía, Ciencias y Artes de Costa Rica (COLYPRO), código 75402, hago constar que he revisado el documento titulado:

**PROPUESTA DE PROTOCOLO ANALGÉSICO MULTIMODAL CON  
IMPLEMENTACIÓN DE CRIOANALGESIA PARA PACIENTES SOMETIDOS A  
TÉCNICA DE NUSS EN EL HOSPITAL CALDERÓN GUARDIA**

Dicho documento fue elaborado por Valerie Quesada Vargas, cédula de identidad 114530414, con el fin de optar al grado de Especialista en Anestesiología y Recuperación. He revisado y corregido aspectos tales como construcción de párrafos, vicios del lenguaje trasladados a lo escrito, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico.

Atentamente,

*Fernanda S. Coto*



MARIA  
FERNANDA  
SANABRIA  
COTO (FIRMA)

Firmado digitalmente por MARIA  
FERNANDA SANABRIA COTO (FIRMA)  
Nombre de reconocimiento (DN):  
serialNumber=CPF-01-1429-0780,  
sn=SANABRIA COTO, givenName=MARIA  
FERNANDA, c=CR, o=PERSONA FISICA,  
ou=CIUDADANO, cn=MARIA FERNANDA  
SANABRIA COTO (FIRMA)  
Motivo: Revisión filológica  
Ubicación: Costa Rica  
Fecha: 2025.12.14 22:21:16 -06'00'

María Fernanda Sanabria Coto  
Filóloga  
Cédula de identidad 1-1429-0780  
Colypro. Código 75402  
Asociación Costarricense de Filólogos. Carné nro. 225  
fernanda.sanabria@filologos.cr  
Teléfono: +506 6022 9569

## TABLA DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS .....	ii
HOJA DE APROBACIÓN DEL COMITÉ ASESOR .....	iii
CARTA DE REVISIÓN FILOLÓGICA.....	iv
TABLA DE CONTENIDOS .....	v
RESUMEN .....	ix
ABSTRACT.....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS .....	xiii
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Justificación.....	1
1.2. Pregunta de investigación .....	3
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. Objetivo general .....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Metodología .....	4
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1. Anatomía y fisiología relevantes de la pared torácica y los nervios intercostales .....	5
2.1.1. Estructura ósea y articular de la pared torácica .....	5
2.1.2. Músculos y tejidos blandos de la pared torácica .....	7
2.1.3. Inervación de la pared torácica: nervios intercostales.....	11
2.1.4 Fisiología de la conducción nerviosa y nocicepción torácica .....	14
2.2. Fisiopatología del dolor postoperatorio en cirugía torácica y en el procedimiento de Nuss.....	16

2.2.1. Definición y clasificación del dolor postoperatorio .....	16
2.2. Mecanismos fisiopatológicos del dolor en cirugía torácica .....	17
2.2.3. Consideraciones quirúrgicas del procedimiento de Nuss .....	19
2.2.4. Dolor postoperatorio en la corrección de pectus excavatum (procedimiento de Nuss) .....	25
2.2.5. Impacto clínico del dolor postoperatorio mal controlado .....	27
2.2.5.1. Complicaciones respiratorias .....	27
2.2.5.2. Retraso en la movilización y recuperación funcional .....	28
2.2.5.3. Dolor crónico postoperatorio (DCPO) .....	28
2.2.5.4. Impacto psicológico y en la calidad de vida .....	30
2.3. Manejo actual del dolor postoperatorio en pectus excavatum: estrategias farmacológicas y técnicas regionales .....	31
2.3.1. Analgesia con opioides intravenosos .....	32
2.3.1.2. Uso de analgesia controlada por el paciente (PCA) .....	34
2.3.2. Analgésicos no opioides .....	36
2.3.2.1. Antiinflamatorios no esteroideos (AINE) .....	37
2.3.2.2. Paracetamol y metamizol .....	38
2.3.3. Coadyuvantes analgésicos .....	40
2.3.3.1. Gabapentinoides .....	40
2.3.3.2. Ketamina intravenosa .....	41
2.3.3.3. Lidocaína intravenosa .....	42
2.3.3.4. Sulfato de magnesio .....	43
2.3.3.5. Dexametasona .....	43
2.3.3.6. Dexmedetomidina .....	44
2.3.4. Estrategias multimodales intravenosas .....	45
2.3.5. Anestésicos locales en analgesia regional .....	47

2.4. Técnicas de analgesia regional en pectus excavatum .....	48
2.4.1. Analgesia epidural torácica .....	49
2.4.2. Bloqueo paravertebral torácico .....	51
2.4.3. Bloqueo del plano erector de la espina.....	53
2.4.4. Bloqueos intercostales e infiltraciones locales .....	54
2.5. Fundamentos de la crianalgesia: mecanismos de acción, evidencia clínica, ventajas y limitaciones .....	56
2.5.1. Fundamentos fisiológicos y mecanismo de acción de la crianalgesia.....	56
2.5.2. Aspectos técnicos y modalidades de aplicación de la crianalgesia intercostal	58
2.5.2.1. Crianalgesia intraoperatoria bajo visión directa toracoscópica .....	59
2.5.2.2. Crianalgesia percutánea guiada por ultrasonido .....	62
2.5.3. Evidencia clínica sobre la eficacia analgesia, consumo de opioides, recuperación y dolor crónico .....	66
2.5.4. Ventajas de la crianalgesia .....	68
2.5.6. Limitaciones y posibles complicaciones de la crianalgesia .....	69
2.6. Comparación de la crianalgesia con otras técnicas analgésicas en la cirugía de pectus excavatum .....	71
2.6.1. Crianalgesia versus técnicas regionales .....	71
2.6.2. Crianalgesia versus analgesia intravenosa .....	72
<b>CAPÍTULO III. PROTOCOLO ANALGÉSICO MULTIMODAL CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CRIOANALGESIA EN CIRUGÍA DE NUSS.....</b>	<b>74</b>
3.1. Consideraciones preoperatorias .....	74
3.1.1. Profilaxis neuroprotectora .....	76
3.1.2. Crianalgesia percutánea previo al MIRPE .....	77
3.1.2.1. Criterios de selección del paciente .....	77
3.1.2.2. Preparación del paciente .....	78

3.1.2.3. Procedimiento en sala de operaciones 48 horas antes .....	78
3.1.2.4. Técnica percutánea guiada por ultrasonido .....	79
3.1.2.5. Proceso de recuperación .....	80
3.1.2.6. Precauciones y contraindicaciones .....	80
3.2. Consideraciones transoperatorias durante el MIRPE.....	81
3.2.1. Consideraciones transoperatorias con crioanalgesia percutánea previa.....	81
3.2.2. Consideraciones transoperatorias con crioanalgesia toracoscópica intraoperatoria .....	82
3.2.3. Preparación anestésica integral y monitorización transoperatoria .....	84
3.2.4. Consideraciones farmacológicas intraoperatorias .....	86
3.3. Consideraciones postoperatorias .....	91
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN .....	98
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES .....	101
BIBLIOGRAFÍA .....	103
APÉNDICES .....	114
Apéndice 1. Flujograma de aplicación de crioanalgesia.....	114
Apéndice 2. Esquema farmacológico multimodal para el manejo perioperatorio del MIRPE .....	115
ANEXOS .....	116
Anexo 1. Licencia de publicación.....	116
Anexo 2. Carta de aprobación de la tutora.....	117
Anexo 3. Carta de aprobación de lectora .....	118

## RESUMEN

El *pectus excavatum* es la deformidad congénita más frecuente de la pared torácica y su corrección mediante la técnica de Nuss se asocia con uno de los dolores postoperatorios más intensos en cirugía de tórax. Esto convierte su manejo analgésico en un reto trascendental para los anestesiólogos, ya que el dolor mal controlado incrementa significativamente la morbilidad, favoreciendo complicaciones respiratorias, limitación funcional y riesgo de dolor crónico. En este contexto, la crioanalgesia intercostal ha surgido como una herramienta eficaz para reducir la intensidad del dolor y el consumo de opioides, ofreciendo un bloqueo prolongado y reversible que optimiza la recuperación.

Este trabajo tiene como objetivo diseñar un protocolo analgésico multimodal con integración de la crioanalgesia para pacientes sometidos al procedimiento de Nuss en el Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia. Por lo que se realizó una revisión narrativa de la literatura reciente, analizando evidencia clínicamente relevante sobre fisiopatología del dolor, efectividad de las estrategias multimodales y beneficios comparativos de la crioanalgesia en este contexto.

A partir de la información recopilada, se propone un protocolo estructurado que define criterios de selección, aspectos técnicos de la crioanalgesia e integración con analgesia sistémica y coadyuvantes. Su implementación pretende optimizar el control del dolor postoperatorio, disminuir complicaciones relacionadas, prevenir la cronificación y mejorar la recuperación funcional de los pacientes.

## ABSTRACT

Pectus excavatum is the most common congenital deformity of the anterior chest wall, and its correction through the Nuss procedure is associated with severe postoperative pain. This makes analgesia a significant challenge for anesthesia providers, as inadequate pain control increases morbidity by contributing to respiratory complications, delayed mobilization, and a higher risk of chronic postoperative pain. Intercostal cryoanalgesia has gained attention as a technique that offers prolonged and reversible nerve blockade, potentially reducing opioid requirements and improving recovery.

A narrative review of the recent literature was conducted, including clinical studies, systematic reviews, and practice guidelines published in the past ten years. Searches were performed in PubMed, Scopus, Cochrane, and UpToDate. The review focused on the pathophysiology of pain in the Nuss procedure, current multimodal analgesic strategies, and the clinical performance, safety profile, and feasibility of implementing intercostal cryoanalgesia. These findings informed the development of a multimodal analgesic protocol for use at Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia.

The evidence indicates that cryoanalgesia consistently reduces postoperative pain scores, opioid consumption, and length of hospital stay when used as part of a multimodal regimen. Studies also describe improved respiratory function, earlier mobilization, and a lower incidence of chronic postoperative pain. These benefits support its integration into perioperative management for the Nuss procedure.

The proposed protocol outlines patient selection criteria, technical considerations for cryoanalgesia, and its incorporation into a multimodal analgesic strategy. Its implementation may optimize postoperative pain control, reduce morbidity associated with inadequate analgesia, and enhance functional recovery in patients undergoing the Nuss procedure.

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tipos de fibras nerviosas y sus características funcionales .....	14
<b>Tabla 2.</b> Principales mediadores inflamatorios implicados en la fisiopatología del dolor ..	18
<b>Tabla 3.</b> Etapas clave del procedimiento de Nuss y riesgos asociados.....	25
<b>Tabla 4.</b> Impacto clínico del dolor postoperatorio mal controlado en MIRPE.....	30
<b>Tabla 5.</b> Resumen comparativo de los esquemas de PCA.....	36
<b>Tabla 6.</b> Comparación de analgésicos no opioides utilizados en el MIRPE.....	39
<b>Tabla 7.</b> Coadyuvantes farmacológicos utilizados en la analgesia multimodal para el MIRPE .....	46
<b>Tabla 8.</b> Comparación de técnicas de analgesia regional en el MIRPE.....	55
<b>Tabla 9.</b> Comparación entre abordaje toracoscópico intraoperatorio y abordaje percutáneo guiado por imágenes en crioanalgesia intercostal.....	65
<b>Tabla 10.</b> Evidencia clínica de la crioanalgesia en MIRPE .....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esqueleto de caja torácica .....	5
<b>Figura 2.</b> Articulaciones de la caja torácica.....	6
<b>Figura 3.</b> Vertebrae torácicas .....	7
<b>Figura 4.</b> Músculos intercostales .....	8
<b>Figura 5.</b> Músculos de la dinámica ventilatoria.....	8
<b>Figura 6.</b> Músculos dorsales, plano intermedio y profundo .....	10
<b>Figura 7.</b> Nervio intercostal y sus ramas a lo largo de su recorrido .....	12
<b>Figura 8.</b> A Origen y recorrido de los nervios intercostales, vista transversal superior. B. Estructuras intercostales. C. Dermatomo cutáneo de la pared torácica. ....	13
<b>Figura 9.</b> Vías del dolor y vías moduladoras. A. Sistema de transmisión de mensajes nociceptivos. B. Red de modulación del dolor .....	15
<b>Figura 10.</b> Personalización de las barras, según medidas del paciente.....	20
<b>Figura 11.</b> Proceso de preformado de las barras de Nuss. ....	21
<b>Figura 12.</b> Posicionamiento del paciente. ....	22
<b>Figura 13.</b> Incisiones laterales por donde se introducen las barras de Nuss. ....	23
<b>Figura 14.</b> Elaboración del túnel retroesternal, por donde se introducen las barras definitivas. .....	24
<b>Figura 15.</b> Colocación de catéter epidural .....	50
<b>Figura 16.</b> Imagen ecográfica oblicua parasagital de la región paravertebral torácica. ....	52
<b>Figura 17.</b> Imagen ecográfica de la región del plano del erector de la espina.....	53
<b>Figura 18.</b> Portal de acceso extrapleural con introducción de la óptica toracoscópica. ....	60
<b>Figura 19.</b> Generación del ice ball en la superficie costal durante crioanalgesia intercostal. .....	61
<b>Figura 20.</b> A. Posición del paciente y marcación de los espacios intercostales; B. Colocación del transductor, C. Reconocimiento del del espacio intercostal; D. Identificación Doppler del paquete neurovascular.....	63

**LISTA DE ABREVIATURAS**

- AINE:** Antiinflamatorios no esteroideos
- BIS:** Índice biespectral
- CCSS:** Caja Costarricense del Seguro Social
- CPOT:** *Critical Care Pain Observation Tool*
- DCPO:** Dolor crónico postoperatorio
- DN4:** *Douleur Neuropathique 4 Questions*
- ERAS:** *Enhanced Recovery After Surgery*
- ESP:** Bloqueo del erector de la espina dorsal
- EVA:** Escala visual análoga
- GABA:** Ácido gamma-aminobutírico
- IASP:** Asociación Internacional para el Estudio del Dolor
- LAST:** Intoxicación sistémica por anestésicos locales
- LOS:** Estancia hospitalaria (*Length of stay*)
- MIRPE:** Reparación mínimamente invasiva del *pectus excavatum*
- NMDA:** N-metil-D-aspartato
- NVPO:** Náuseas y vómitos postoperatorios
- OME:** Equivalentes de morfina oral
- PCA:** Analgesia controlada por el paciente
- POD:** Día postoperatorio
- PVB:** Bloqueo paravertebral torácico
- TEA:** Analgesia epidural torácica
- URPA:** Unidad de Recuperación Post Anestésica

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Justificación

El *pectus excavatum* es la malformación congénita más frecuente de la pared torácica anterior, con una incidencia estimada entre 1 de cada 400 a 1000 nacimientos, siendo más prevalente en hombres. Su progresión durante la adolescencia puede generar repercusiones tanto físicas como psicológicas. Entre las principales afectaciones físicas, se incluyen distintos grados de restricción pulmonar y cardiovascular, alteraciones posturales, mayor incidencia de escoliosis y dolor crónico. Mientras que, a nivel psicológico, puede provocar baja autoestima, ansiedad y depresión, impactando significativamente la calidad de vida del paciente.

En la actualidad, el procedimiento de Nuss, también conocido como *Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum* (MIRPE), es la técnica quirúrgica más utilizada para su corrección. Se prefiere por su menor dificultad técnica, menor pérdida sanguínea y mejores resultados estéticos, minimizando las cicatrices visibles, en comparación con otras técnicas previamente utilizadas. Mediante asistencia por videotoracoscopia, este procedimiento consiste en la introducción de una o más barras de acero curvadas detrás del esternón, las cuales se rotan para corregir la deformidad. Dichas barras se fijan a los costados del tórax y se retiran después de 2 o 3 años, una vez que la estructura torácica ha sido remodelada.

Sin embargo, esta rápida remodelación del tórax, aunado a la presión intensa y constante ejercida por las barras, genera dolor postoperatorio severo y prolongado. Este dolor es multifactorial, derivado tanto del trauma quirúrgico como de la activación de nociceptores en los tejidos inflamados. Por su parte, la respuesta inflamatoria provoca edema, hipersensibilidad e irritación de los nervios intercostales, lo que puede desencadenar espasmos musculares, opresión torácica y dificultad respiratoria, aumentando el riesgo de complicaciones pulmonares. Como resultado, muchos pacientes experimentan una recuperación prolongada con limitaciones en la movilidad y en su calidad de vida, tanto en las primeras semanas del postoperatorio como, en algunos casos, durante todo el tiempo que permanecen con las barras.

Por lo tanto, el manejo del dolor postoperatorio representa uno de los mayores retos no solo para el personal de anestesiología, sino también para enfermería y el equipo quirúrgico, exigiendo estrategias avanzadas para mejorar la recuperación y prevenir la cronificación del dolor. Tradicionalmente, se ha empleado analgesia multimodal, combinando opioides, AINE, coadyuvantes y técnicas de analgesia regional, tanto neuroaxiales como periféricas. Estas estrategias han mostrado efectividad en los primeros días postquirúrgicos; sin embargo, no siempre son suficientes para garantizar una recuperación sin complicaciones, ya que muchos pacientes presentan dolor persistente y dificultades al retomar sus actividades diarias tras el alta hospitalaria.

En los últimos años, se han explorado nuevas técnicas para optimizar el manejo del dolor, siendo la crioanalgesia una de las más prometedoras. Esta técnica utiliza una criosonda que libera óxido nitroso o dióxido de carbono, alcanzando temperaturas entre  $-50$  y  $-70$  °C, lo que induce una degeneración walleriana temporal de los axones nerviosos, bloqueando la transmisión del dolor sin afectar las estructuras neurales circundantes. La regeneración axonal ocurre en aproximadamente 4 a 6 semanas, restableciendo la función sin generar daño permanente.

Diversos estudios han demostrado que la crioanalgesia en el procedimiento de Nuss reduce significativamente la estancia hospitalaria y el consumo de opioides, no solo en el postoperatorio inmediato, sino también en las semanas posteriores, favoreciendo una recuperación más rápida, segura y efectiva. Además, al disminuir la necesidad de opioides, se reducen los efectos adversos asociados a su uso prolongado, como náuseas, depresión respiratoria y dependencia.

Dado su potencial clínico, y considerando que esta técnica aún no forma parte de un protocolo estandarizado en el Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, se propone el desarrollo de un protocolo analgésico para su implementación en pacientes sometidos a corrección de *pectus excavatum* mediante técnica de Nuss. Este protocolo busca integrar la crioanalgesia dentro de un esquema multimodal de manejo del dolor, estableciendo pautas claras, basadas en evidencia, para su aplicación segura y efectiva.

La estandarización de este abordaje contribuirá a fortalecer la atención anestésica y postoperatoria, optimizar recursos, mejorar los resultados clínicos y sentar las bases para su implementación en otros centros hospitalarios del país.

## **1.2. Pregunta de investigación**

¿Cómo contribuye el uso de crianalgesia en el manejo del dolor postoperatorio y recuperación funcional en pacientes con *pectus excavatum* sometidos al procedimiento de Nuss?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Diseñar un protocolo clínico para la implementación de crioterapia como estrategia analgésica regional en pacientes con *pectus excavatum* sometidos al procedimiento de Nuss, considerando su impacto en el control del dolor postoperatorio, la recuperación funcional y la prevención de la cronificación del dolor.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

1. Detallar los fundamentos fisiopatológicos del dolor postoperatorio en pacientes con *pectus excavatum* sometidos al procedimiento de Nuss.
2. Examinar la evidencia científica disponible sobre la eficacia, seguridad y utilidad clínica de la crianalgesia como técnica analgésica regional en el contexto quirúrgico.
3. Establecer los criterios clínicos y técnicos para la aplicación de crianalgesia en pacientes intervenidos mediante la técnica de Nuss.
4. Elaborar un protocolo clínico que integre la crianalgesia dentro de un esquema multimodal de manejo del dolor postoperatorio.
5. Proponer estrategias de implementación institucional para el protocolo en el Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, considerando aspectos operativos y de seguridad.

#### 1.4. Metodología

Este estudio corresponde a un diseño descriptivo de tipo documental, cuyo propósito es elaborar un protocolo clínico para la implementación de la crioanalgesia como técnica de manejo del dolor postoperatorio en pacientes con *pectus excavatum* sometidos al procedimiento de Nuss. Para sustentar esta propuesta, se realiza una revisión narrativa de la literatura científica reciente, enfocada en estudios que analicen la seguridad, eficacia y utilidad clínica de esta técnica en el contexto quirúrgico.

La búsqueda de información se llevó a cabo en bases de datos biomédicas de alto prestigio, como PubMed, UpToDate, Scopus y Cochrane, considerando publicaciones en inglés o español con una antigüedad no mayor a 10 años. Además, se incluyen estudios clínicos, revisiones narrativas o sistemáticas y guías de práctica clínica que aborden el uso de crioanalgesia como parte del manejo multimodal del dolor en pacientes intervenidos mediante la técnica de Nuss.

Para la selección del material, se aplican criterios de inclusión y exclusión previamente definidos. Se consideran investigaciones que evalúen pacientes sometidos al procedimiento de Nuss en las que se haya implementado crioanalgesia, mientras que se descartan aquellos trabajos en los que este no sea el abordaje quirúrgico principal o que no proporcionen información relevante sobre el manejo analgésico postoperatorio.

La selección de fuentes fue intencionada, priorizando los documentos que aportaran datos clínicamente aplicables y relevantes para la elaboración del protocolo. A partir de los hallazgos, se desarrolla una guía práctica que contemple los criterios clínicos y técnicos para la aplicación de la crioanalgesia, su integración en el esquema multimodal de analgesia postoperatoria, y las condiciones institucionales necesarias para su implementación segura y efectiva en el Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia.

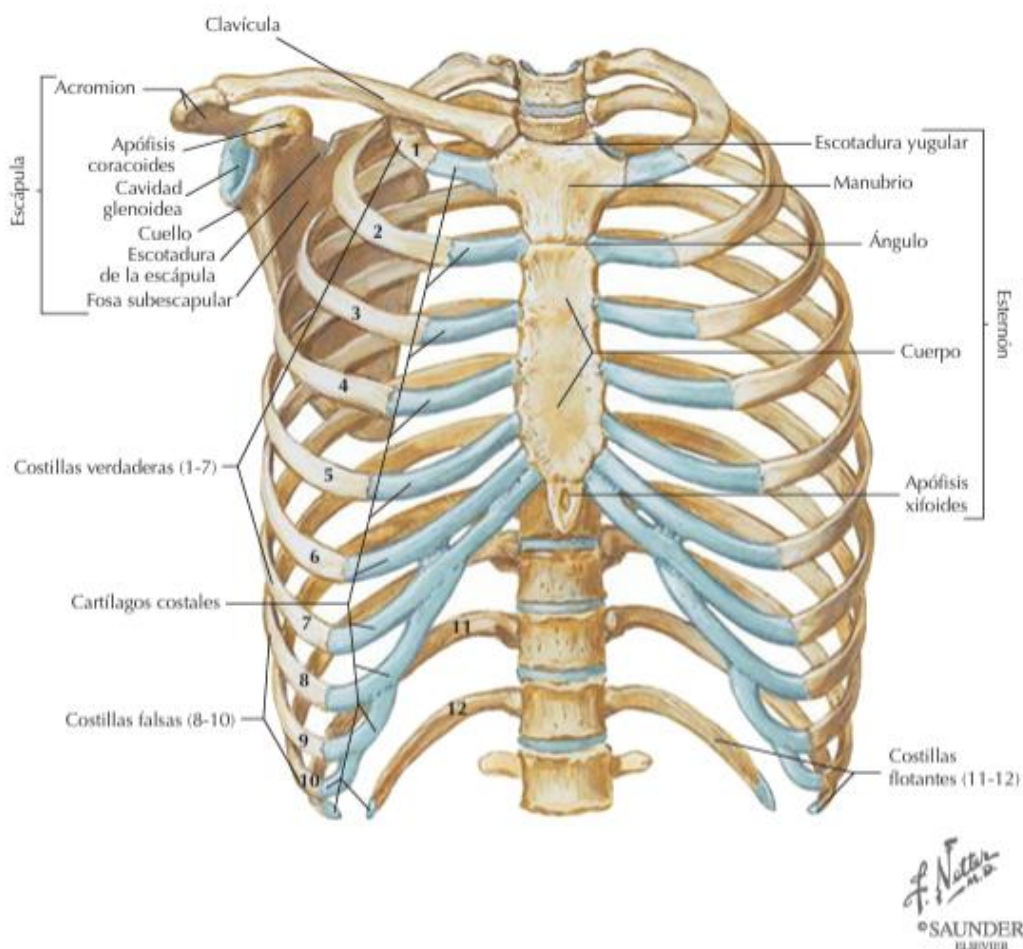
## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Anatomía y fisiología relevantes de la pared torácica y los nervios intercostales

#### 2.1.1. Estructura ósea y articular de la pared torácica

La pared torácica es una estructura constituida por estructuras óseas, articulares, condrales y musculares, cuya función principal es proteger órganos vitales intratorácicos y favorecer la ventilación pulmonar. Anatómicamente, se encuentra delimitada anteriormente por el esternón, lateral por las costillas y posterior por la columna vertebral torácica. Las articulaciones costovertebrales y costovertebrales proporcionan movilidad necesaria para la mecánica respiratoria, al mismo tiempo que otorgan soporte estructural (figura 1). (1)

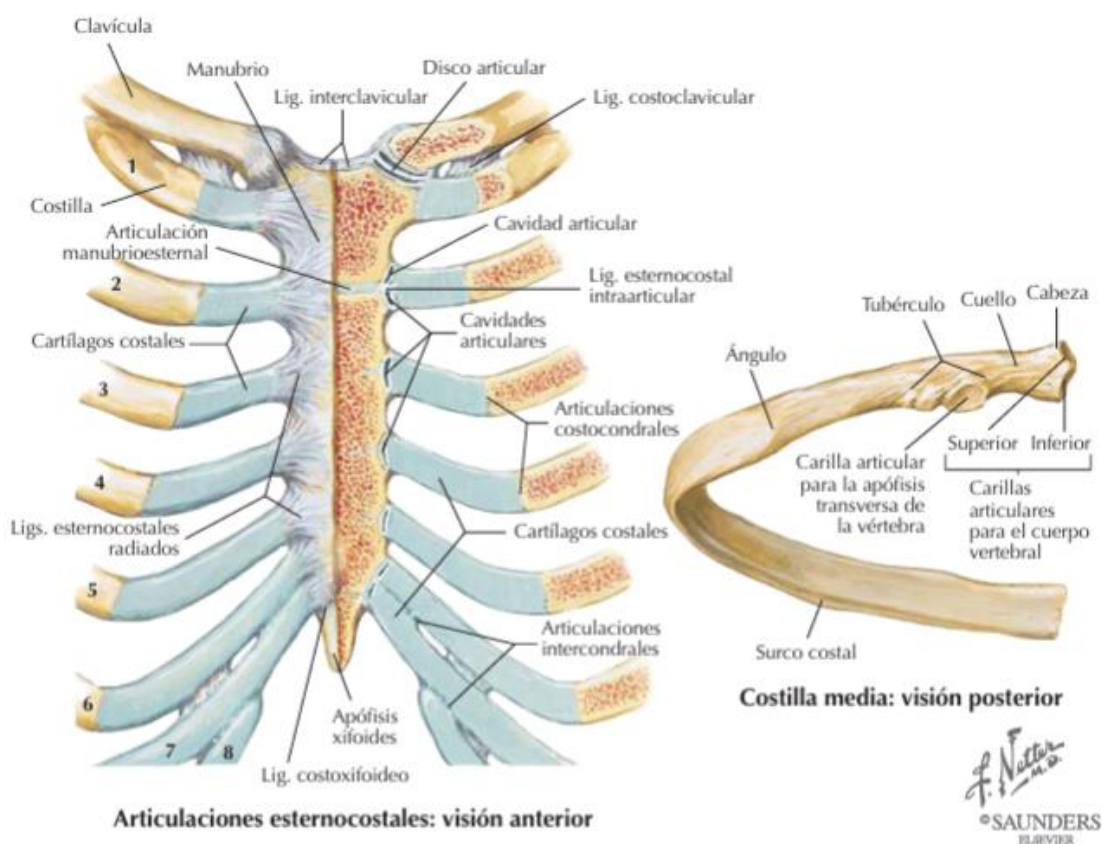
**Figura 1.** Esqueleto de caja torácica



Fuente: (2).

El esternón se divide en tres segmentos: manubrio, cuerpo esternal y apófisis xifoides, unidos entre sí por articulaciones cartilagosas. La unión entre el cuerpo del esternón y la apófisis xifoides se denomina articulación xifoesternal, generalmente de tipo sincondrosis, la cual tiende a osificarse con la edad adulta (figura 2). (1)

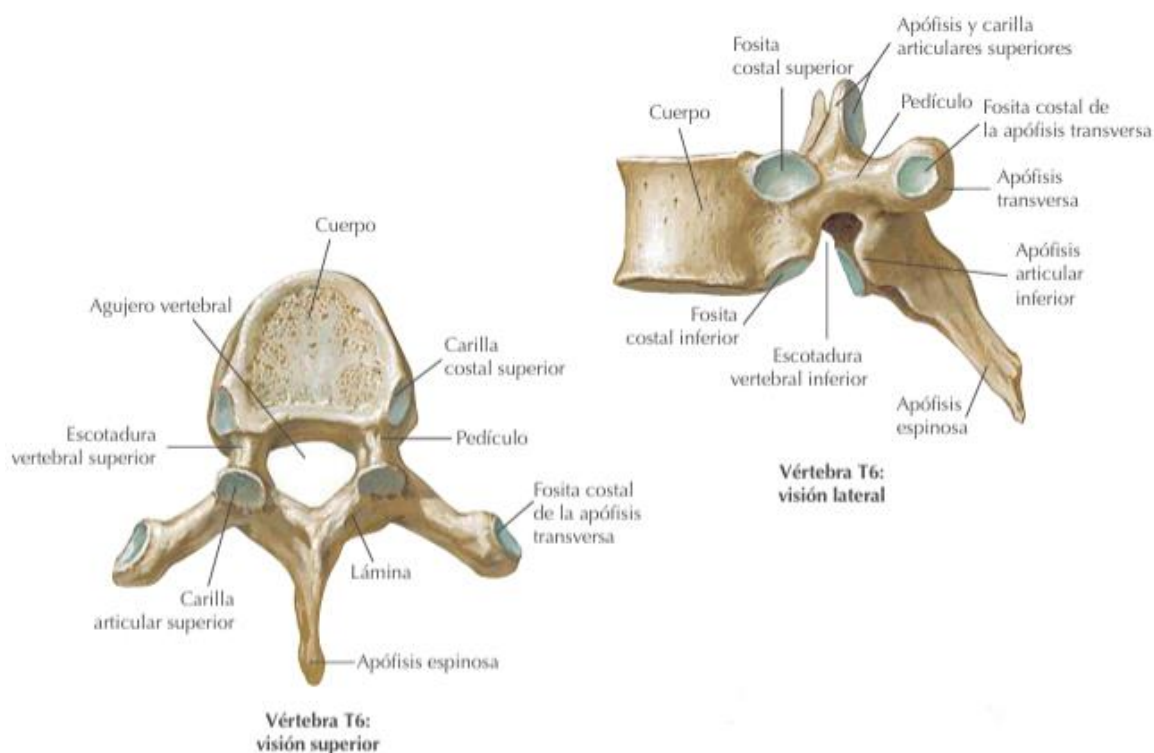
**Figura 2.** Articulaciones de la caja torácica



Fuente: (2).

Las costillas articulan posteriormente con las vértebras torácicas mediante dos estructuras: la cabeza de cada costilla se une a la cara costal de una o dos vértebras adyacentes mediante la articulación costovertebral, mientras que el tubérculo de la costilla se articula con la apófisis transversa de la vértebra correspondiente a través de la articulación costotransversa. Además, las costillas 11 y 12, al ser flotantes, no presentan articulación costotransversa (figura 3). (1)

**Figura 3. Vertebrae torácicas**



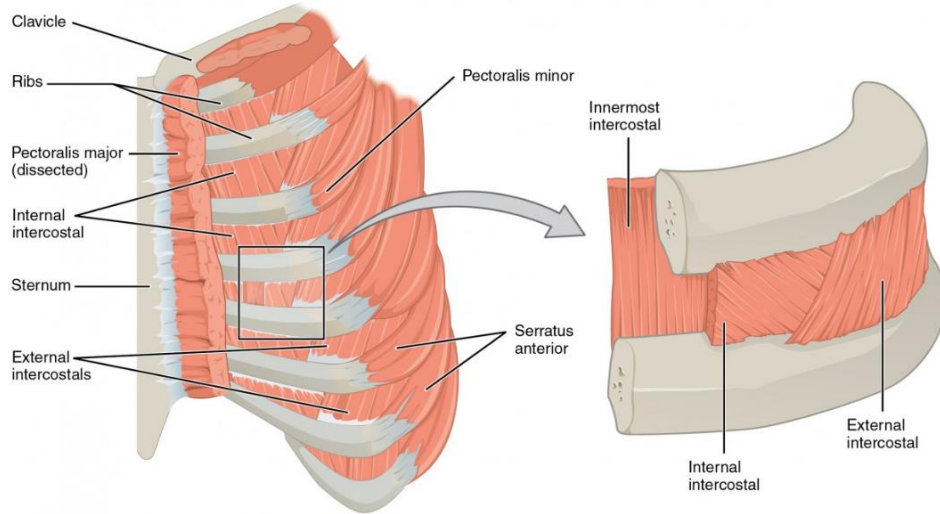
Fuente: (2).

Las costillas verdaderas van de la primera a la séptima, las falsas van de la octava a la décima y las flotantes la onceava y doceava. Estas articulan directamente con el esternón mediante los cartílagos costales individuales, mientras que las falsas lo hacen mediante un cartílago costal común. Por su parte, las flotantes no articulan directamente con el esternón. (1)

### 2.1.2. Músculos y tejidos blandos de la pared torácica

La pared torácica incluye diversos grupos musculares que desempeñan un papel fundamental en la ventilación pulmonar. Entre los principales destacan los músculos intercostales externos, internos e íntimos, organizados en capas superpuestas entre los espacios costales. Los músculos intercostales externos son los principales responsables de la inspiración activa, elevando las costillas para expandir la cavidad torácica. Por su parte, los músculos intercostales internos e íntimos intervienen predominantemente durante la espiración forzada, facilitando la disminución del volumen torácico al deprimir las costillas (figura 4). (1)

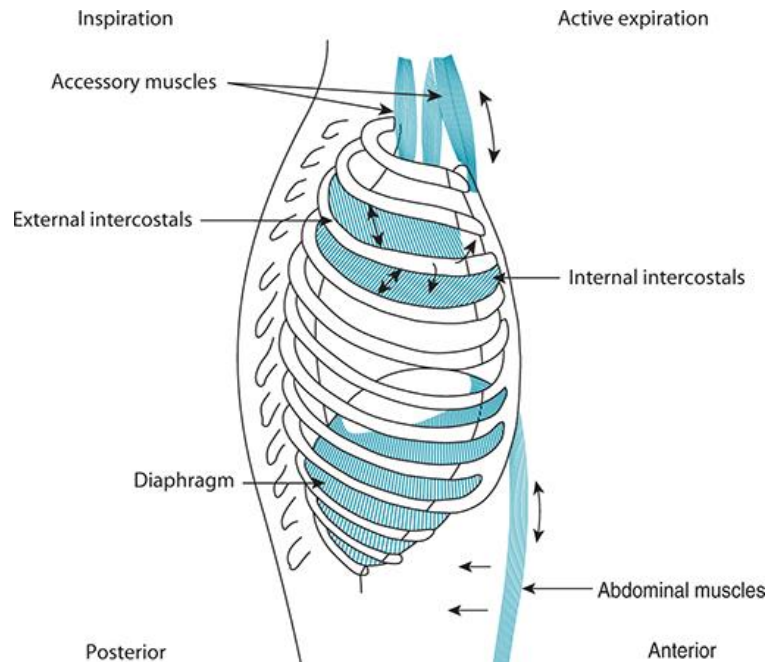
**Figura 4. Músculos intercostales**



*Fuente: (3).*

Durante situaciones que requieren mayor esfuerzo ventilatorio, como ejercicio intenso, obstrucción de la vía aérea, enfermedades restrictivas o hipoxemia aguda, se activan los músculos accesorios de la respiración. Entre ellos, el pectoral mayor, pectoral menor, serrato anterior y los escalenos actúan principalmente elevando la parrilla costal superior y ampliando el volumen torácico (figura 5). (4)

**Figura 5. Músculos de la dinámica ventilatoria**

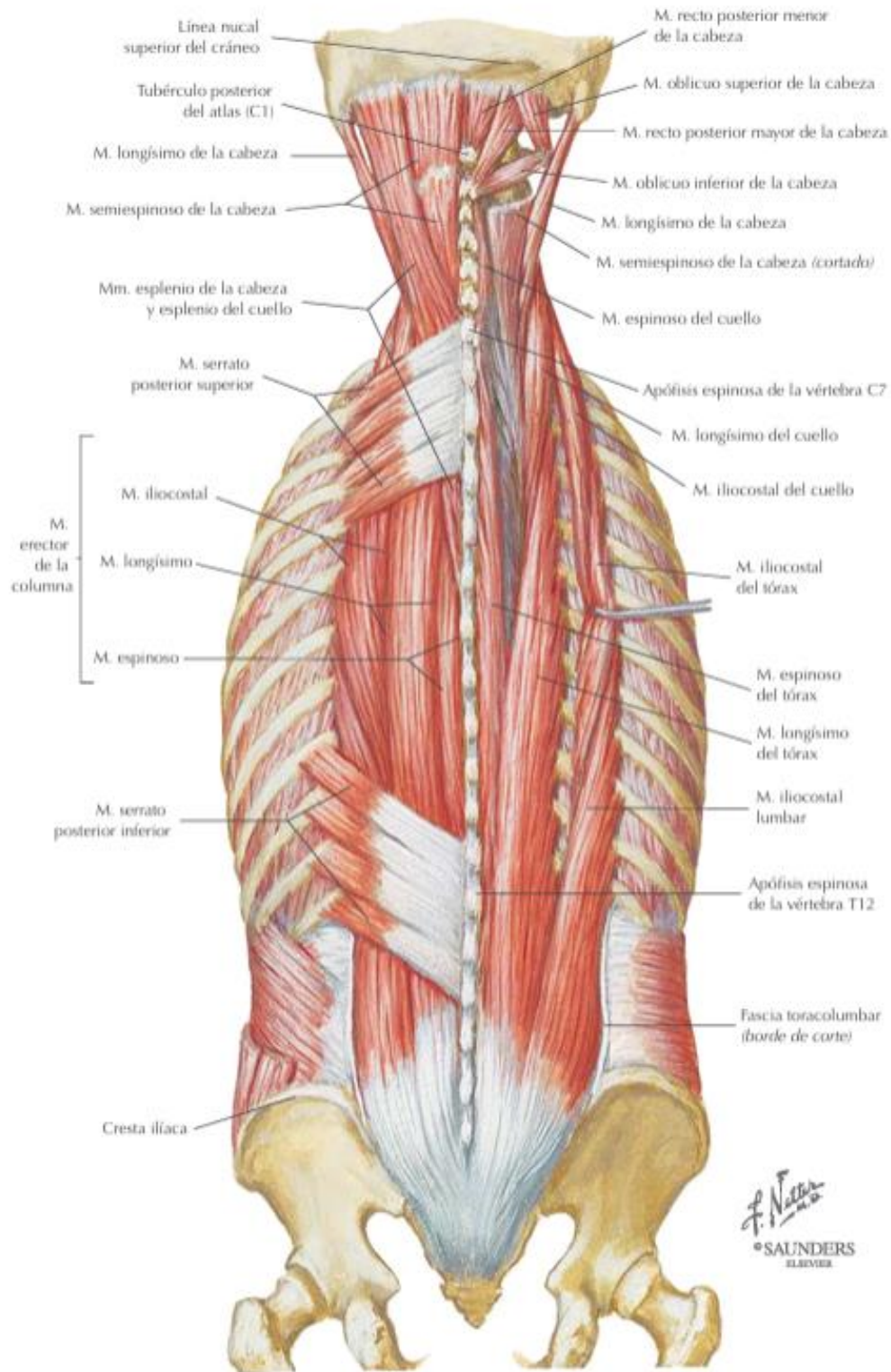


*Fuente: (5).*

La región posterior de la pared torácica está formada por músculos profundos y superficiales que, aunque no están directamente involucrados en la respiración, cumplen funciones esenciales de estabilidad, postura y movimiento de la caja torácica y la columna vertebral (figura 6). El más trascendental es el músculo erector de la espina, un grupo muscular compuesto por tres columnas: iliocostal, longísimo y espinoso. Se extiende desde la región sacra hasta la base del cráneo, discurrendo a lo largo de la columna vertebral, y su función principal es extender y mantener la postura erecta del tronco, así como facilitar movimientos de inclinación y rotación. Otro músculo relevante es el serrato posterosuperior, ubicado en el ángulo superior del tórax, profundo al trapecio. Este músculo tiene fibras que se insertan en las costillas de la segunda a la quinta y contribuye levemente a la inspiración al elevarlas durante la fase inicial. (6)

Los tejidos blandos de la pared torácica comprenden la fascia superficial y profunda, el tejido celular subcutáneo, vasos y nervios intercostales, así como la pleura parietal, que recubre internamente la cavidad torácica. Estas estructuras juegan un papel fundamental tanto en la integridad funcional de la caja torácica como en su relevancia clínica, dada su estrecha relación con trayectos nerviosos y vasculares relevantes. (1)

**Figura 6.** Músculos dorsales, plano intermedio y profundo



Fuente: (2).

### 2.1.3. Inervación de la pared torácica: nervios intercostales

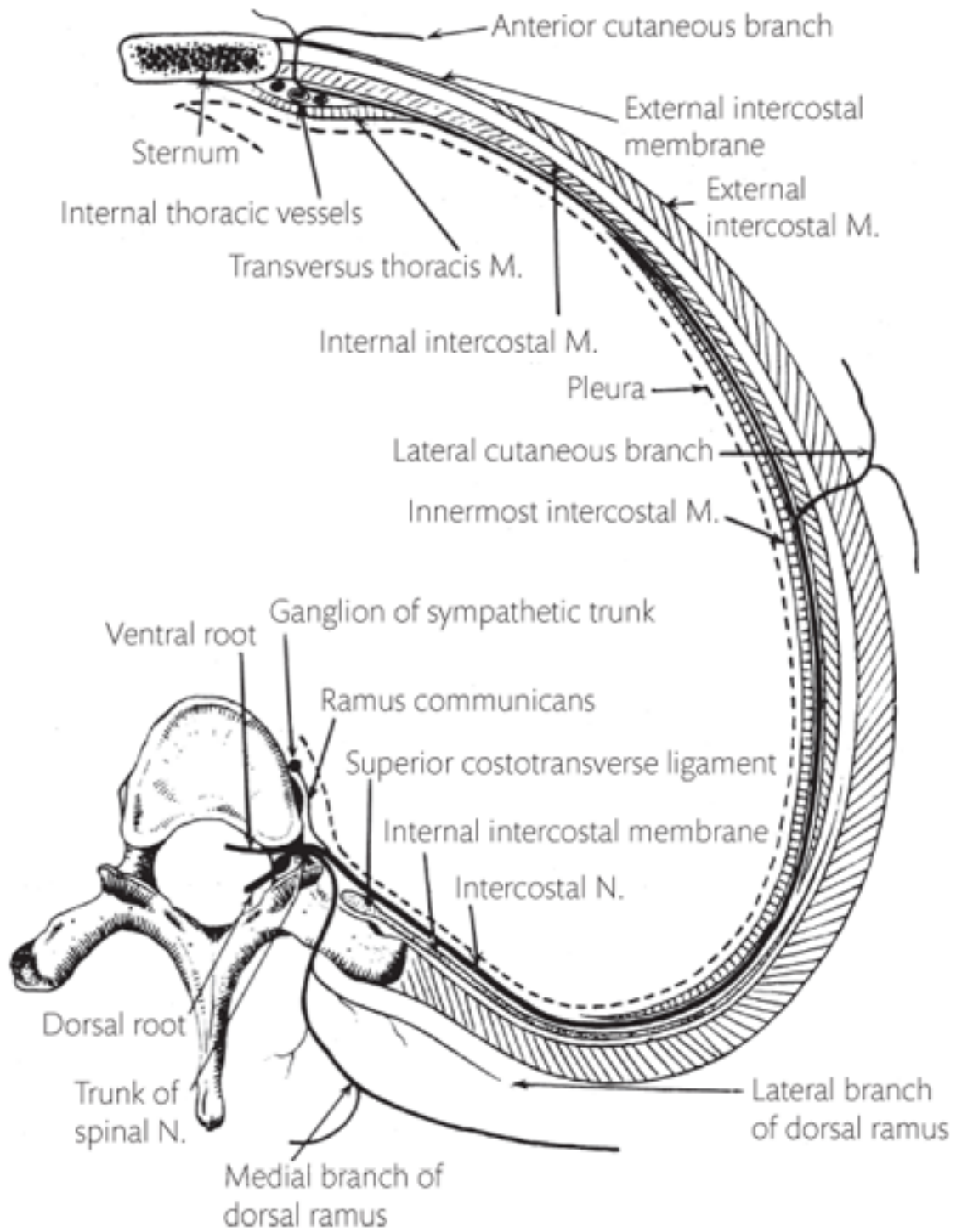
La inervación de la pared torácica está dada principalmente por los nervios intercostales, que son las ramas anteriores de los nervios raquídeos torácicos de T1 a T11, además del nervio subcostal de T12, que discurre por debajo de la duodécima costilla. Cada nervio intercostal se origina a partir del foramen intervertebral correspondiente, donde emerge del asta anterior de la médula espinal como raíz motora, y del asta posterior como raíz sensitiva, de la médula espinal. Estas se unen en el ganglio espinal para formar el nervio espinal mixto (figura 8 [A]). Allí, da lugar a su rama anterior, el nervio intercostal, que se dirige por el surco costal del borde inferior de cada costilla. (1)

Estos nervios son de tipo mixto, ya que contienen fibras motoras, sensitivas y autonómicas simpáticas. Las fibras motoras inervan los músculos intercostales, el músculo transverso del tórax, el músculo serrato posterior superior e inferior y parte del músculo oblicuo externo del abdomen. Las fibras sensitivas recogen estímulos provenientes de la piel torácica y abdominal, músculos, costillas, pleura parietal, peritoneo parietal y estructuras osteomusculares relacionadas. (7)

En su trayecto, cada nervio intercostal discurre acompañado por la arteria y la vena intercostal homónimas, conformando el denominado haz neurovascular intercostal. Este paquete se aloja en el surco costal de la costilla superior correspondiente (figura 8 [B]). A lo largo de su recorrido, los nervios intercostales emiten múltiples ramas como lo son: ramas colaterales que siguen el borde superior de la costilla inferior, ramas musculares, ramas cutáneas laterales que emergen a nivel de la línea axilar media e inervan la piel lateral del tórax y ramas cutáneas anteriores que emergen cerca del esternón e inervan la región anterior del tórax y parte del abdomen (figura 7). (1)

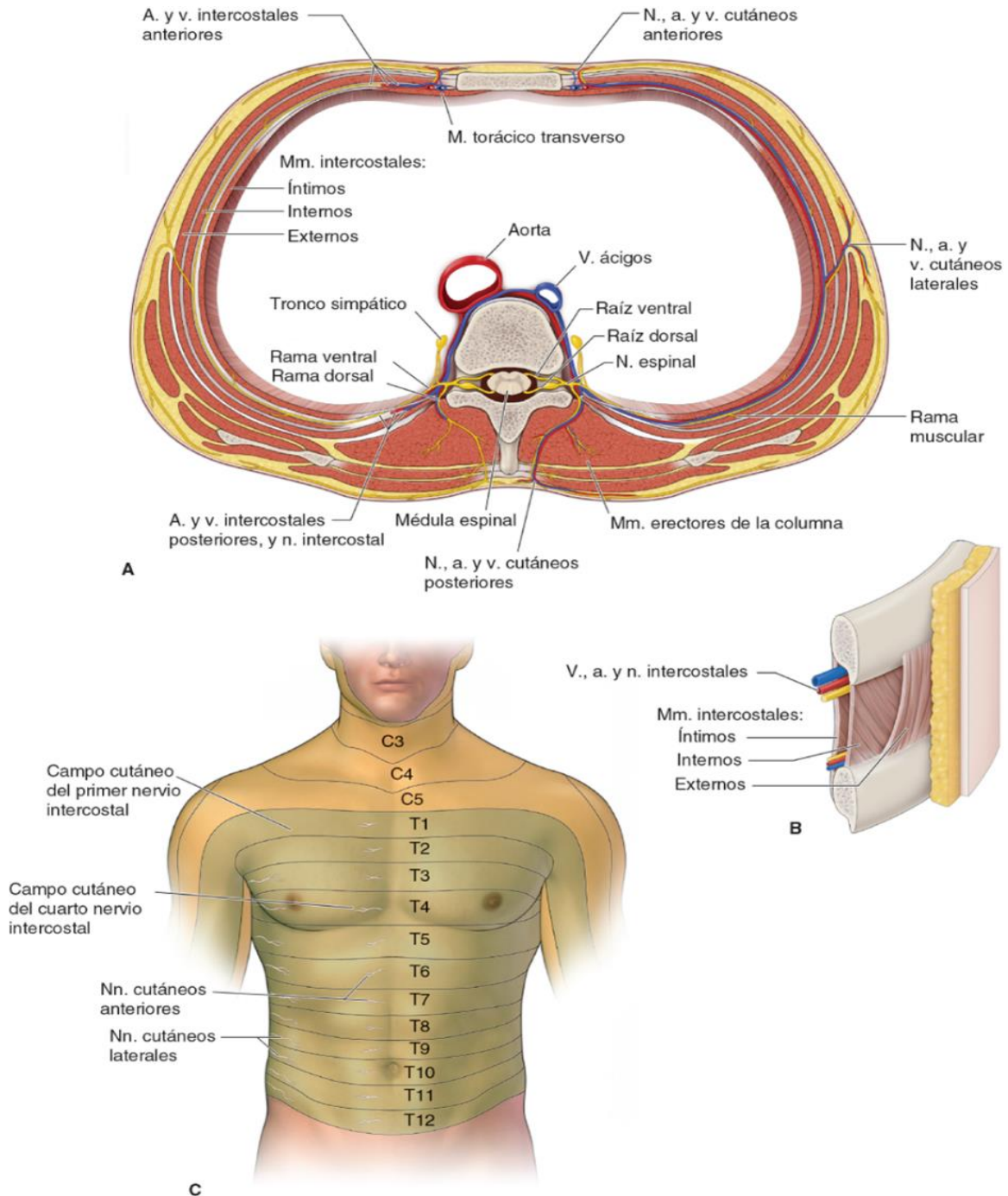
Desde el punto de vista funcional, la inervación sensitiva de la pared torácica está segmentada en dermatomas torácicos, cada uno correspondiente a un nivel espinal (figura 8 [C]). Esta segmentación es clínicamente relevante en técnicas anestésicas y analgésicas, como el bloqueo de nervios intercostales o la crioanalgesia, ya que permite identificar el origen del dolor y dirigir el tratamiento a los niveles implicados. (9)

**Figura 7.** Nervio intercostal y sus ramas a lo largo de su recorrido



Fuente: (8).

**Figura 8.** A Origen y recorrido de los nervios intercostales, vista transversal superior. B. Estructuras intercostales. C. Dermatomos cutáneos de la pared torácica.



Fuente: David A. Morton, K. Bo Foreman, Kurt H. Albertine: Anatomía macroscópica. Un panorama general, 2e Copyright © McGraw Hill Education. Todos los derechos reservados.

Fuente: (10).

La disposición anatómica de los nervios intercostales en la región posterolateral del tórax facilita su abordaje tanto por visión toracoscópica como mediante acceso percutáneo

guiado por ultrasonido. En ambas técnicas, se aprovecha su recorrido constante a lo largo del borde inferior de las costillas, alojados entre los músculos intercostales interno e íntimo, justamente en la zona que recibe mayor presión durante la corrección quirúrgica del *pectus excavatum* mediante la técnica MIRPE. (11)

Finalmente, el nervio intercostal participa en el circuito de la nocicepción, lo cual se explora en el siguiente apartado. Sin embargo, cabe destacar que la disposición anatómica de estos nervios y su cercanía a la pleura parietal hacen que el trauma quirúrgico, la manipulación instrumental o el enfriamiento excesivo puedan generar complicaciones neurológicas, como parestesias, disestesias o dolor neuropático a largo plazo. (12)

#### 2.1.4 Fisiología de la conducción nerviosa y nocicepción torácica

La fisiología de la conducción nerviosa en la pared torácica está íntimamente relacionada con la transmisión del estímulo doloroso desde los receptores periféricos hacia el sistema nervioso central. En el contexto quirúrgico, comprender estos mecanismos es esencial para diseñar estrategias analgésicas eficaces, como la crioanalgesia. (13)

La conducción nerviosa de los impulsos eléctricos en los nervios intercostales depende de la integridad funcional de las fibras nerviosas mielinizadas y amielínicas que componen estos nervios mixtos. Entre ellas, las fibras mielinizadas A $\beta$  son las encargadas de transmitir estímulos táctiles y de dolor rápido, localizado y punzante. Por su parte, las fibras amielínicas tipo C transmiten dolor sordo, difuso y de carácter persistente (tabla 1). (13)

**Tabla 1.** Tipos de fibras nerviosas y sus características funcionales

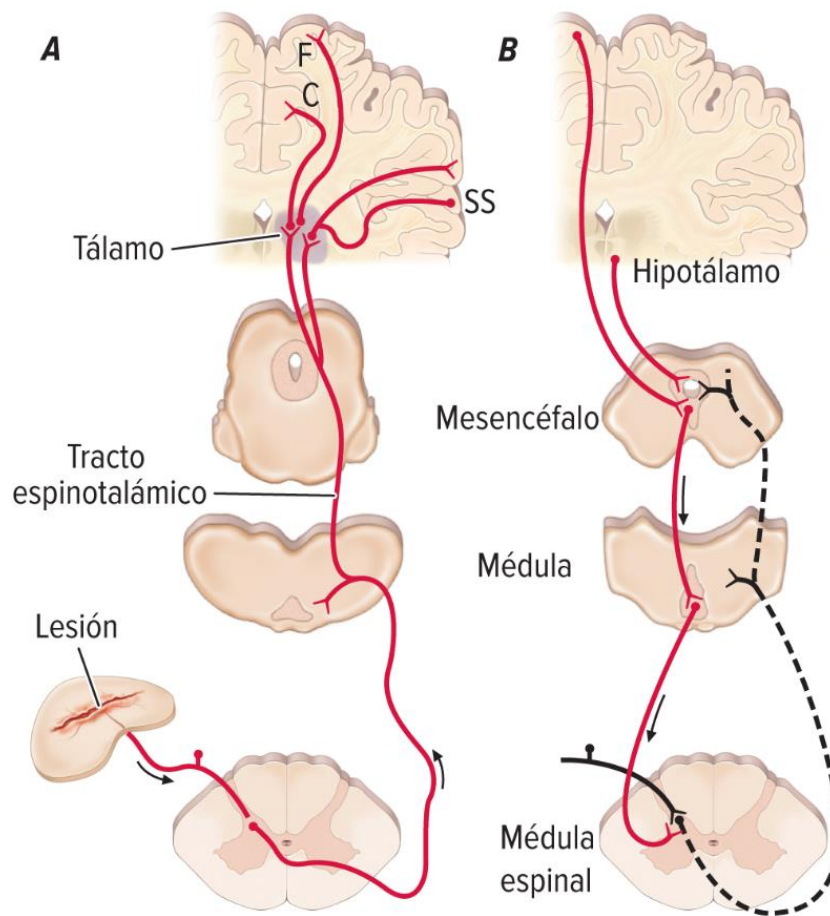
Tipo de fibra	Función principal	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	Velocidad de conducción (m/s)
A $\alpha$	Propiocepción, motora somática	12–20	70–120
A $\beta$	Tacto, presión	5–12	30–70
A $\gamma$	Motora hacia husos musculares	3–6	15–30
A $\delta$	Dolor agudo, temperatura	2–5	12–30
B	Fibras autonómicas preganglionares	< 3	3–15
C (raíz dorsal)	Dolor crónico, temperatura	0.4–1.2	0.5–2
C (simpático)	Fibras simpáticas posganglionares	0.3–1.3	0.7–2.3

Fuente: (14).

El impulso eléctrico se inicia cuando un estímulo nocivo, ya sea mecánico, térmico o químico, activa los nociceptores localizados en la piel, músculos, articulaciones y pleura parietal de la pared torácica. Esta activación provoca un cambio en el potencial de membrana, abriendo canales de sodio dependientes de voltaje, lo que genera un potencial de acción que se propaga a lo largo del axón hacia el asta dorsal de la médula espinal. (13)

Una vez allí, las fibras aferentes hacen sinapsis con neuronas de segundo orden, que cruzan al lado contralateral y ascienden a través del tracto espinotalámico lateral hacia el tálamo. En este núcleo, se procesa la información y se proyecta a la corteza somatosensorial donde se produce la percepción consciente del dolor (figura 9).

**Figura 9.** Vías del dolor y vías moduladoras. A. Sistema de transmisión de mensajes nociceptivos. B. Red de modulación del dolor



Fuente: J.L. Jameson, A.S. Fauci, D.L. Kasper, S.L. Hausen, D.L. Longo, J. Loscalzo: Harrison Manual de Medicina, 20e Copyright © McGraw Hill Education. Todos los derechos reservados.

Fuente: (15).

Al mismo tiempo que se da la transmisión del estímulo nociceptivo, el sistema nervioso cuenta con mecanismos de modulación del dolor que influyen en la percepción final del mismo. Estos mecanismos pueden ser inhibitorios o facilitadores y operan tanto a nivel medular como supramedular. En la médula espinal, las interneuronas inhibitorias en la sustancia gelatinosa del asta dorsal regulan la transmisión de los impulsos nociceptivos mediante neurotransmisores como el ácido gamma-aminobutírico (GABA) y las encefalinas. A nivel cerebral, estructuras como la sustancia gris periacueductal, el bulbo rostral ventromedial y el locus coeruleus participan en vías descendentes que pueden suprimir la señal nociceptiva antes de que alcance la corteza somatosensorial, modulando así la experiencia dolorosa de manera dinámica según el contexto fisiológico o emocional del individuo. (13)

Cabe destacar que la irritación, compresión o lesión de los nervios intercostales — como puede ocurrir durante intervenciones torácicas— no solo puede generar dolor agudo, sino también desencadenar fenómenos de sensibilización periférica y central. Estos mecanismos neuroplásticos pueden perpetuar la respuesta nociceptiva e inducir un estado de hiperalgesia o alodinia, aumentando el riesgo de desarrollar dolor neuropático crónico. (9)

## **2.2. Fisiopatología del dolor postoperatorio en cirugía torácica y en el procedimiento de Nuss**

### **2.2.1. Definición y clasificación del dolor postoperatorio**

El dolor postoperatorio se define como la experiencia sensorial y emocional desagradable, asociada a daño tisular real o potencial, que ocurre tras una intervención quirúrgica. Según la Asociación Internacional para el Estudio del Dolor (IASP), este tipo de dolor puede clasificarse tanto por su duración como por sus mecanismos fisiopatológicos. (16)

El dolor agudo es aquel que se presenta inmediatamente después de la cirugía y suele estar relacionado con el trauma tisular, la inflamación local y la manipulación quirúrgica. En cuanto al dolor subagudo, este se caracteriza por persistir más allá del período habitual para la cicatrización, por lo general, hasta los tres meses posteriores al procedimiento. Finalmente, el dolor crónico postoperatorio (DCPO) se prolonga más allá de tres meses después de la

intervención quirúrgica y se asocia frecuentemente con mecanismos de sensibilización central, lesión nerviosa y dolor neuropático. (16)

En términos fisiopatológicos, el dolor puede clasificarse como nociceptivo, neuropático o mixto. El dolor nociceptivo proviene de la activación de receptores específicos denominados nociceptores, ante estímulos mecánicos, térmicos o químicos. El dolor neuropático, en cambio, resulta de una lesión directa o disfunción de estructuras nerviosas. Por último, el dolor mixto implica una combinación de mecanismos nociceptivos y neuropático, siendo especialmente frecuente en procedimientos quirúrgicos torácicos, como el procedimiento MIRPE, donde coexisten inflamación tisular y lesión nerviosa subclínica. (16,17)

Además de su impacto físico, el dolor postoperatorio puede tener consecuencias psicológicas importantes, como ansiedad, insomnio e incluso depresión, especialmente cuando no se maneja de manera adecuada. Estas manifestaciones emocionales pueden amplificar la percepción del dolor a través de mecanismos de sensibilización central. Por eso, un abordaje multimodal y anticipado del dolor postquirúrgico, que incluya medidas farmacológicas y regionales eficaces, es clave no solo para mejorar el confort del paciente, sino también para prevenir su transición hacia formas crónicas más difíciles de tratar. (18)

## **2.2. Mecanismos fisiopatológicos del dolor en cirugía torácica**

El dolor en la cirugía torácica es complejo y multifactorial, resultado de una cascada de eventos que inicia con el trauma quirúrgico y se perpetúa mediante mecanismos neurofisiológicos locales y centrales. Comprender este proceso es esencial para el desarrollo de estrategias analgésicas eficaces que permitan prevenir complicaciones como el dolor crónico postoperatorio o la disfunción respiratoria.

Tras la incisión quirúrgica o manipulación de tejidos, se desencadena una respuesta inflamatoria aguda, caracterizada por la liberación de mediadores químicos como prostaglandinas, bradicinina, histamina, serotonina y leucotrienos. Estos mediadores sensibilizan y activan a los nociceptores, los cuales son terminaciones nerviosas especializadas localizadas en la piel, los músculos, las articulaciones, la pleura parietal y otras estructuras torácicas. Conjuntamente, se liberan neurotransmisores como sustancia P y

glutamato en el asta dorsal de la médula espinal, amplificando la señal nociceptiva y favoreciendo la transmisión del dolor hacia centros superiores del sistema nervioso central. (19)

La activación de los nociceptores ocurre, principalmente, en fibras nerviosas de tipo A $\delta$  (rápidas, localizadas, de dolor agudo) y C (lentas, difusas, de dolor persistente), las cuales transmiten el impulso a través de los nervios intercostales hacia la médula espinal. Allí, hacen sinapsis con neuronas de segundo orden en el asta dorsal, donde la señal puede amplificarse si existe un proceso de sensibilización central, fenómeno que implica un aumento de la excitabilidad de las neuronas medulares ante estímulos repetitivos o persistentes. (20) En la tabla 2, se detallan los principales mediadores inflamatorios implicados en la fisiopatología del dolor.

**Tabla 2.** Principales mediadores inflamatorios implicados en la fisiopatología del dolor

<b>Mediador</b>	<b>Origen celular</b>	<b>Acción fisiológica</b>	<b>Participación en el dolor</b>
Bradicinina	Células endoteliales	Vasodilatación, aumento de permeabilidad vascular	Sensibiliza nociceptores, incrementando la respuesta a estímulos
Prostaglandinas (PGE2)	Células inflamatorias (macrófagos, mastocitos)	Modulador de la respuesta inflamatoria	Potencian receptores TRPV1, disminuyen el umbral de activación nociceptiva
Histamina	Mastocitos	Vasodilatación, prurito	Estimula receptores H1 en nociceptores periféricos
Serotonina (5-HT)	Plaquetas activadas	Vasoconstricción, agregación plaquetaria	Activación directa de fibras C, potenciación del dolor
Interleucina-1 $\beta$ (IL-1 $\beta$ )	Macrófagos, monocitos	Activación inmunológica, fiebre	Favorece liberación de prostaglandinas, participa en la cronificación del dolor
TNF- $\alpha$	Macrófagos, células T	Inflamación sistémica	Estimula síntesis de otras citoquinas, puede causar hiperexcitabilidad nociceptiva

*Fuente:*(21).

La sensibilización periférica, por su parte, ocurre cuando los nociceptores disminuyen su umbral de activación debido a la presencia sostenida de mediadores inflamatorios. Esto explica por qué, tras una intervención quirúrgica, incluso estímulos leves como el roce de

una sábana pueden percibirse como dolorosos, término denominado alodinia, o amplificarse en intensidad, hiperalgesia. (22)

En el contexto de la cirugía de tórax, como la corrección quirúrgica del *pectus excavatum* mediante la técnica de Nuss, se produce una considerable distensión de estructuras osteomusculares, compresión de nervios intercostales por las barras de corrección y manipulación de la pleura parietal, todos ellos factores que contribuyen tanto a la activación de nociceptores como a una potencial lesión de fibras nerviosas. Esta lesión puede inducir fenómenos de neuroplasticidad maladaptativa, como la proliferación de terminaciones nerviosas aberrantes o la pérdida de inhibición descendente, lo cual predispone al desarrollo de dolor neuropático o persistente a largo plazo. (23,24)

Se ha observado que la cirugía torácica altera el equilibrio entre mecanismos excitatorios e inhibitorios del sistema nervioso, lo que favorece la cronificación del dolor. La disfunción de sistemas moduladores descendentes, como los mediados por serotonina y noradrenalina, disminuye la capacidad del organismo para contrarrestar los estímulos dolorosos, perpetuando así la sintomatología. (25,26).

Dado este escenario, el adecuado abordaje analgésico debe contemplar tanto la inhibición de la señal periférica (mediante anestésicos locales, antiinflamatorios o crioadalgia) como el control central (mediante coadyuvantes neuromoduladores), en el marco de una estrategia multimodal orientada a prevenir la sensibilización y la cronificación del dolor. (25)

### **2.2.3. Consideraciones quirúrgicas del procedimiento de Nuss**

El procedimiento de Nuss, también conocido como reparación mínimamente invasiva del *pectus excavatum* (MIRPE, por sus siglas en inglés), fue introducido en 1998 por el Dr. Donald Nuss como una alternativa menos invasiva que la técnica abierta de Ravitch. Desde su implementación, se ha consolidado como el abordaje quirúrgico de elección para la corrección del *pectus excavatum* en pacientes pediátricos, adolescentes y adultos jóvenes, debido a su menor agresión tisular, recuperación más rápida y superior resultado estético. (11,27,28)

Esta técnica quirúrgica consiste en la inserción subesternal de una o más barras metálicas precurvadas en forma de C, generalmente de acero inoxidable, diseñadas para empujar el esternón hacia anterior y corregir la deformidad torácica. Las barras de Nuss son modeladas de acuerdo con las proporciones del paciente para garantizar una corrección anatómica individualizada (ver figuras 10 y 11).

*Figura 10. Personalización de las barras, según medidas del paciente.*



*Fuente: fotografía tomada por el autor (Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, 2025)*

*Figura 11. Proceso de preformado de las barras de Nuss.*



*Fuente: fotografía tomada por el autor (Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, 2025)*

Esta técnica consiste en la inserción subesternal de una o más barras metálicas, generalmente de acero inoxidable, precurvadas en forma de C y ajustadas con las proporciones del paciente. Estas barras de Nuss son diseñadas para empujar hacia delante el esternón deprimido y remodelar la pared torácica. El procedimiento se realiza bajo anestesia general y la duración quirúrgica oscila entre 60 y 120 minutos en promedio, dependiendo de la complejidad anatómica del defecto, la morfología torácica y la experiencia del equipo quirúrgico. (17,27,29,30)

*Figura 12. Posicionamiento del paciente.*



*Fuente: fotografía tomada por el autor (Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, 2025)*

El paciente se posiciona en decúbito supino y, en algunas ocasiones, el equipo quirúrgico prefiere colocar los brazos en abducción para mejorar la exposición. No obstante, se ha descrito un riesgo aumentado de neuropatía del plexo braquial con esta posición, por lo que algunos centros recomiendan mantener los brazos adosados al cuerpo o en abducción menor a 90°, sobre todo en procedimientos prolongados (figura 12). (31)

La técnica quirúrgica incluye la realización de dos pequeñas incisiones en la línea axilar media, a la altura del punto de mayor depresión esternal (figura 13). A través de estas, se introduce el toracoscopio y el instrumental quirúrgico. La toracoscopia permite una visualización directa de las estructuras mediastinales, reduciendo el riesgo de complicaciones mayores durante la creación del túnel retroesternal. Este túnel se disecciona cuidadosamente entre el pericardio y la cara posterior del esternón utilizando un disector o una guía introductora, conectando ambas incisiones laterales. Esta es una fase crítica del procedimiento, ya que puede conllevar riesgos como laceraciones cardíacas, lesión de vasos mediastinales, diafragma o parénquima pulmonar. (17,32)

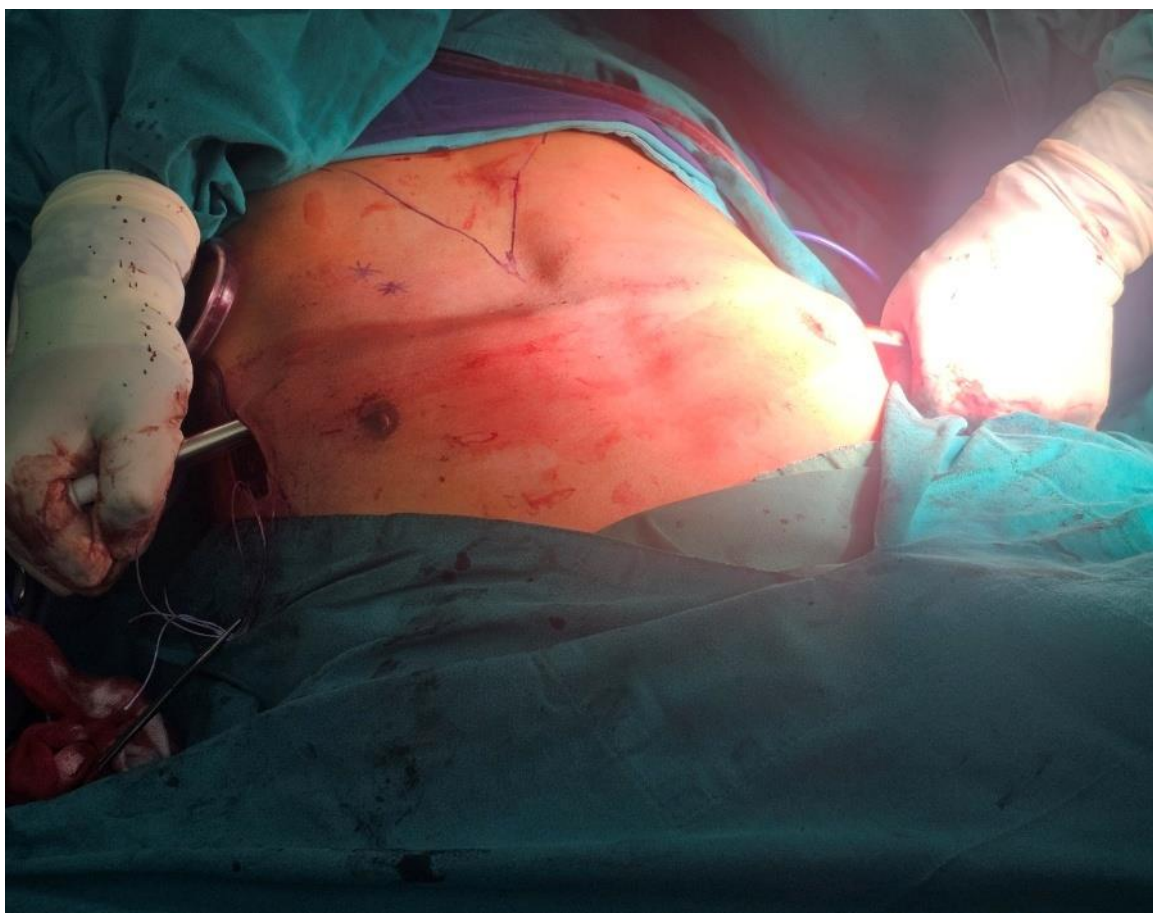
**Figura 13.** Incisiones laterales por donde se introducen las barras de Nuss.



Fuente: fotografía tomada por el autor (Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, 2025)

Una vez creado el túnel, la barra metálica precurvada se introduce a través de este y se rota 180° sobre su eje longitudinal, elevando el esternón y remodelando la arquitectura torácica (figura 14). En casos de deformidades extensas o asimétricas, puede colocarse una segunda barra. La fijación del implante se logra mediante estabilizadores metálicos bilaterales o puntos pericostales, cuya función es evitar desplazamientos, rotaciones o migraciones del implante. Además, las barras se dejan habitualmente *in situ* por un periodo de 2 a 4 años, tras el cual se programan para su remoción mediante una nueva intervención quirúrgica. (17,32)

**Figura 14.** Elaboración del túnel retroesternal, por donde se introducen las barras definitivas.



Fuente: fotografía tomada por el autor (Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, 2025)

Desde la perspectiva analgésica, este procedimiento representa un reto sustancial. El dolor postoperatorio se caracteriza por ser intenso y prolongado, debido a la presión constante

ejercida por la barra sobre la pared torácica anterior, además de la irritación o compresión de los nervios intercostales, particularmente entre T3 y T8, niveles habitualmente comprometidos. Este dolor suele tener un componente mixto, tanto nociceptivo como neuropático, lo que refuerza la necesidad de implementar estrategias multimodales de analgesia que incluyan técnicas regionales como la crioanalgesia. (33) En la tabla 3 se presentan las etapas clave de este procedimiento.

**Tabla 3.** *Etapas clave del procedimiento de Nuss y riesgos asociados*

<b>Etapas quirúrgicas</b>	<b>Descripción</b>	<b>Riesgos asociados</b>
Posicionamiento del paciente	Decúbito supino, brazos en abducción o adosados al cuerpo	Neuropatía del plexo braquial
Incisiones torácicas	Línea axilar media, a nivel de la mayor depresión esternal	Lesión vascular o nerviosa superficial
Toracoscopia y creación del túnel	Disección retroesternal entre pericardio y esternón	Laceraciones cardíacas, lesiones vasculares/mediastinales
Introducción y rotación de la barra	Rotación de 180° para elevar el esternón	Hemotórax, dolor severo, compresión de estructuras
Fijación y estabilización	Uso de estabilizadores metálicos o puntos pericostales	Migración de barra, infección, desplazamiento

*Fuente: (31,34).*

#### **2.2.4. Dolor postoperatorio en la corrección de pectus excavatum (procedimiento de Nuss)**

Si bien el procedimiento de MIRPE se trata de una técnica mínimamente invasiva, implica una agresión significativa sobre estructuras musculares, óseas y nerviosas de la pared torácica. El dolor postoperatorio asociado es reconocido como uno de los más intensos entre de las cirugías torácicas electivas, con una intensidad máxima durante las primeras 48 a 72 horas tras la intervención. siendo particularmente severo e incluso discapacitante durante los primeros días posteriores a la intervención quirúrgica. Este dolor puede llegar a ser tan severo y limitante, que llega a afectar sustancialmente la recuperación funcional del paciente. (26,35,36)

Entre los principales factores causantes del dolor postoperatorio, destaca la tracción y compresión de los nervios intercostales durante la creación del túnel retroesternal, así como la presión constante ejercida por las barras de Nuss sobre el esternón y las costillas, lo cual provoca una estimulación mecánica continua de nociceptores y mecanorreceptores. Esta estimulación mantenida genera una señal nociceptiva sostenida que activa mecanismos de sensibilización periférica y central. (11,35)

Asimismo, la manipulación quirúrgica y la implantación de cuerpos extraños, como lo son las barras, estabilizadores y puntos de fijación, desencadenan una respuesta inflamatoria local importante, lo cual intensifica la percepción dolorosa. La distensión abrupta del cartílago costal y del tejido conectivo durante la elevación esternal también contribuye al dolor, al generar microtraumas tisulares adicionales. (11,12)

Un aspecto relevante en este contexto es el riesgo de desarrollar dolor crónico postoperatorio (DCPO). La literatura reciente reporta que entre 10 % y 30 % de los pacientes sometidos a MIRPE presentan dolor persistente más allá de los tres meses posteriores al procedimiento, con un componente neuropático definido en aproximadamente 4 % a 10 % de los casos (37). Clínicamente, este dolor suele manifestarse como parestesias, hiperalgesia o alodinia, reflejando fenómenos de sensibilización periférica y central asociados a la manipulación y compresión de los nervios intercostales durante la cirugía. (11,12)

En algunos casos, este escenario puede evolucionar hacia un dolor persistente con características neuropáticas, cuyo su abordaje se trata con mayor detalle en una sección posterior. Del mismo modo, el impacto del dolor sobre la mecánica ventilatoria y la función respiratoria será discutido más adelante, dado su papel determinante en la morbilidad postoperatoria. (34)

Dada la intensidad y complejidad del dolor postoperatorio, es fundamental implementar estrategias multimodales desde el intraoperatorio, incluyendo técnicas como la crianalgesia intercostal, que ofrecen un bloqueo prolongado y pueden reducir significativamente el dolor agudo postquirúrgico. (19)

### **2.2.5. Impacto clínico del dolor postoperatorio mal controlado**

El dolor postoperatorio mal controlado en la cirugía torácica, y particularmente en el procedimiento de MIRPE, representa un desafío clínico característico. Su persistencia e intensidad no solo afectan la comodidad del paciente, sino que comprometen directamente la recuperación funcional, incrementan el riesgo de complicaciones respiratorias y cardiovasculares y predisponen al desarrollo de dolor crónico postoperatorio. Estas consecuencias hacen imprescindible una estrategia analgésica eficaz, dirigida a interrumpir de manera temprana los mecanismos fisiopatológicos del dolor y a mejorar los desenlaces clínicos globales. (38)

#### **2.2.5.1. Complicaciones respiratorias**

El procedimiento de Nuss puede presentar complicaciones respiratorias ventilatorias inherentes a la técnica quirúrgica. El neumotórax es la complicación postoperatoria más frecuente tras el MIRPE, especialmente cuando se utiliza toracoscopía con insuflación de CO<sub>2</sub>. (39). Aunque en la mayoría de los casos es autolimitado, su presencia puede contribuir al colapso parcial del parénquima pulmonar, alteraciones en la mecánica ventilatoria y requerimientos adicionales de oxígeno. No obstante, la incidencia de problemas relacionados con neumotórax ha disminuido desde que se estableció como práctica estándar la evacuación completa del gas insuflado al finalizar la cirugía; sin embargo, sigue siendo un riesgo clínicamente relevante. (39,40)

Conjuntamente, el dolor torácico agudo intenso interfiere con la mecánica ventilatoria, ya que los pacientes tienden a evitar respiraciones profundas y a suprimir la tos por temor al dolor. Esto contribuye a una ventilación superficial e ineficaz, con disminución del volumen corriente y la capacidad vital, favoreciendo la aparición de atelectasias, retención de secreciones y, en consecuencia, neumonía postoperatoria. Al mismo tiempo, la presión ejercida por las barras de Nuss sobre la pared torácica exagera esta disfunción ventilatoria, generando hipoxemia y aumentando los requerimientos de oxígeno suplementario, así como la estancia hospitalaria. Estas complicaciones son más frecuentes en las primeras 48–72 horas postoperatorias, donde el dolor es más severo y la cooperación del paciente está más limitada. Por lo tanto, el adecuado control del dolor no solo mejora el

confort del paciente, sino que constituye un elemento crítico para prevenir el agravamiento de estas complicaciones respiratorias postoperatorias. (38,41)

### **2.2.5.2. Retraso en la movilización y recuperación funcional**

El dolor mal controlado limita significativamente la movilización precoz del paciente, que es clave en la prevención de eventos tromboembólicos, pérdida de masa muscular y complicaciones del decúbito prolongado. Dificulta actividades básicas como girarse en la cama, incorporarse, deambular y mantener una postura erguida. Esto no solo prolonga la estancia hospitalaria, sino que también retrasa el inicio de la rehabilitación física y la reintegración a la vida cotidiana, especialmente en adolescentes y adultos jóvenes. (42)

### **2.2.5.3. Dolor crónico postoperatorio (DCPO)**

El DCPO es una complicación reconocida tras diversas intervenciones quirúrgicas y tiene particular relevancia en el contexto del procedimiento de Nuss debido a su asociación con manipulación de estructuras nerviosas sensibles como los nervios intercostales. Según la IASP, se define como aquel dolor que persiste más allá del tiempo normal de recuperación, habitualmente más de tres meses después de la cirugía, y que no puede ser atribuido a otras causas como infecciones, recurrencias o enfermedades subyacentes. (43)

En la cirugía torácica, la incidencia de DCPO puede variar entre un 10 % y un 50 %, dependiendo del tipo de procedimiento, la técnica quirúrgica y el abordaje analgésico utilizado. Específicamente para el procedimiento de Nuss, se han reportado tasas de entre 10 % y 30 %, con un componente neuropático confirmado en aproximadamente 4 % a 10 % de los pacientes (37). Por su parte, las manifestaciones clínicas pueden abarcar desde dolor intermitente de baja intensidad hasta dolor neuropático severo que afecta la funcionalidad y la calidad de vida. (23)

Los mecanismos fisiopatológicos del DCPO son complejos y multifactoriales. Entre los factores más relevantes, se encuentra la lesión directa o indirecta de los nervios intercostales durante la creación del túnel retroesternal y por la presión constante ejercida por la barra metálica contra las costillas y el esternón. Esta agresión provoca degeneración axonal, desmielinización, y, en algunos casos, la formación de un neuroma. Los neuromas se

definen como una proliferación desorganizada de fibras nerviosas y tejido conectivo que se desarrolla como respuesta a una lesión nerviosa, particularmente cuando la regeneración axonal queda interrumpida o mal dirigida. Esta estructura puede volverse hipersensible, generando impulsos ectópicos espontáneos o exagerados ante estímulos mínimos, lo que contribuye significativamente al mantenimiento del dolor neuropático. Como consecuencia, se desencadenan fenómenos de sensibilización periférica y central, que mantienen el estímulo nociceptivo incluso en ausencia de daño activo. (23)

Clínicamente, el DCPO puede manifestarse como alodinia, dolor ante estímulos no dolorosos, hiperalgesia aumento en la percepción del dolor, disestesias, sensaciones anormales y desagradables o dolor tipo ardoroso persistente. La evaluación suele requerir escalas específicas para el dolor neuropático, como la DN4 o el PainDETECT. (44)

El riesgo de desarrollar DCPO se ve incrementado en pacientes con dolor agudo postoperatorio intenso y mal controlado, historia previa de dolor crónico, factores psicológicos como ansiedad o depresión y en aquellos con mayor duración del tiempo quirúrgico o manipulación extensa del plano nervioso intercostal. (45)

Desde el punto de vista terapéutico, el manejo del DCPO es complejo y suele requerir un enfoque multimodal, que incluye fármacos neuromoduladores como gabapentina, pregabalina, antidepresivos tricíclicos, inhibidores de la recaptura de serotonina y noradrenalina, así como intervenciones físicas como la fisioterapia, estimulación eléctrica transcutánea y psicológicas como la terapia cognitivo-conductual. En casos refractarios al tratamiento médico, se pueden considerar intervenciones invasivas, como la radiofrecuencia pulsada sobre los nervios intercostales, que busca modular la transmisión del dolor sin causar destrucción tisular significativa (46,47).

Otras técnicas incluyen la neurectomía con alcohol o fenol, la colocación de catéteres para infusión continua de anestésicos locales y, en casos muy seleccionados, procedimientos quirúrgicos como la resección del neuroma o la estimulación medular. Estas alternativas deben valorarse individualmente, considerando el perfil clínico del paciente, el impacto funcional del dolor y la respuesta a tratamientos previos. (46,47)

La prevención del DCPO es un objetivo prioritario. Diversas estrategias han mostrado beneficios, entre ellas: control efectivo del dolor agudo en el postoperatorio inmediato, uso de técnicas de analgesia regional como los bloqueos intercostales o paravertebrales y la implementación de métodos de neuromodulación como la crioanalgesia intercostal intraoperatoria. Esta última ha ganado terreno debido a su capacidad para interrumpir de forma reversible la conducción nerviosa durante semanas, reduciendo así el riesgo de sensibilización y cronificación del dolor. (9,48)

Dado su impacto funcional, emocional y social, el DCPO tras el procedimiento de Nuss debe ser considerado una prioridad dentro del abordaje perioperatorio, tanto desde la perspectiva preventiva como terapéutica. El seguimiento estrecho de estos pacientes, incluso después del alta quirúrgica, es fundamental para identificar de forma temprana signos de cronificación y ofrecer intervenciones oportunas.

#### 2.2.5.4. Impacto psicológico y en la calidad de vida

El dolor persistente, además de sus implicaciones físicas, tiene un impacto emocional considerable. Puede provocar trastornos del estado de ánimo como ansiedad, depresión e insomnio y, en algunos casos, generar una respuesta de evitación que interfiere con la adherencia a la rehabilitación o el seguimiento médico (45).

**Tabla 4.** Impacto clínico del dolor postoperatorio mal controlado en MIRPE.

<b>Categoría</b>	<b>Consecuencias clínicas principales</b>
Complicaciones respiratorias	Hipoventilación 15-30% Atelectasias 8-20% Neumonía 1-6% Requerimiento de oxígeno suplementario 30-40% Estancia hospitalaria prolongada
Movilización y recuperación funcional	Retraso en la deambulación Aumento del riesgo de trombosis venosa profunda Pérdida de masa muscular Mayor dependencia del cuidado
Dolor crónico postoperatorio (DCPO)	Disestesias, alodinia, hiperalgesia Uso prolongado de analgésicos o neuromoduladores Limitación funcional persistente
Impacto psicológico y calidad de vida	Ansiedad, depresión, insomnio Aislamiento social Dificultades académicas y deportivas Disminución de la satisfacción con el procedimiento

*Fuente: elaboración propia con datos de (40,44,45,47).*

En adolescentes y adultos jóvenes, este impacto psicológico puede traducirse en ausentismo escolar, dificultad en el desempeño académico, alteración de la vida social y pérdida de motivación en actividades deportivas o recreativas (42). El dolor persistente también puede contribuir a una percepción negativa del procedimiento quirúrgico, afectando la satisfacción general del paciente con los resultados de la intervención (tabla 4). (45)

### **2.3. Manejo actual del dolor postoperatorio en pectus excavatum: estrategias farmacológicas y técnicas regionales**

El control eficaz del dolor postoperatorio en pacientes sometidos al procedimiento de MIRPE es esencial para una recuperación óptima, la prevención de complicaciones y la reducción del riesgo de cronificación del dolor. Por lo tanto, las estrategias actuales habitualmente integran una combinación de técnicas regionales y fármacos sistémicos dentro de un esquema analgésico multimodal, siendo estos últimos un pilar fundamental e indispensable para garantizar un adecuado alivio del dolor, facilitar la movilización temprana y favorecer la rehabilitación respiratoria en el postoperatorio inmediato. (36)

El tratamiento farmacológico sistémico no solo actúa como medida inmediata para el control del dolor agudo, sino que también desempeña un papel crucial como complemento de las técnicas regionales, abordando distintos mecanismos fisiopatológicos del dolor nociceptivo, inflamatorio y neuropático. La integración estratégica de analgésicos no opioides, opioides a dosis ajustadas según requerimiento y fármacos coadyuvantes permite optimizar el efecto analgésico, minimizar la aparición de efectos adversos relacionados con dosis altas de opioides y reducir la probabilidad de sensibilización prolongada del sistema nervioso central. (49,50)

Este enfoque se adapta dinámicamente a las características del paciente, la intensidad del dolor y la evolución clínica, además, se considera esencial para facilitar la movilización precoz, mejorar la función respiratoria y promover una recuperación más rápida y segura tras el MIRPE. (51)

### 2.3.1. Analgesia con opioides intravenosos

El uso de opioides por vía intravenosa ha sido históricamente una de las estrategias más utilizadas para el control del dolor postoperatorio en cirugía torácica y, en particular, en el procedimiento de MIRPE. Su eficacia, rapidez de acción y adaptabilidad a distintos esquemas terapéuticos los convierten en un componente esencial del abordaje multimodal del dolor postoperatorio. (52)

Los opioides ejercen su efecto mediante la unión a receptores opioides  $\mu$  (mu),  $\kappa$  (kappa) y  $\delta$  (delta), pertenecientes a la familia de receptores acoplados a proteínas G, ampliamente distribuidos en el sistema nervioso central, la médula espinal y las terminales nerviosas periféricas. (29,49)

La activación del receptor  $\mu$  es el principal responsable del efecto analgésico, ya que reduce la liberación de neurotransmisores excitatorios, como la sustancia P y el glutamato, en las neuronas del asta dorsal de la médula espinal. Asimismo, promueve la hiperpolarización neuronal mediante la apertura de canales de potasio y el cierre de canales de calcio dependientes de voltaje, bloqueando así la propagación del estímulo nociceptivo. (53)

El receptor  $\kappa$  contribuye a la analgesia espinal y sedación, aunque con menor potencia analgésica y mayor incidencia de disforia en algunos pacientes. Por su parte, el receptor  $\delta$  modula la transmisión nociceptiva y puede potenciar el efecto analgésico del receptor  $\mu$ . En las terminales nerviosas periféricas, la activación de receptores  $\mu$  y  $\kappa$  inhiben la generación de potenciales de acción y disminuye la liberación de mediadores inflamatorios. (53)

En el contexto del dolor postoperatorio del MIRPE, la activación de estas vías disminuye la transmisión nociceptiva originada en la pared torácica, reduciendo la percepción del dolor, por lo que favorece la movilización temprana, mejora la tolerancia a la fisioterapia respiratoria y contribuye a una recuperación postoperatoria más satisfactoria. (48,50)

Los opioides pueden administrarse mediante distintos esquemas: dosis intermitentes, infusión continua o analgesia controlada por el paciente (PCA). Las dosis intermitentes

programadas proporcionan analgesia basal, aunque pueden generar fluctuaciones en los niveles plasmáticos y periodos de control insuficiente del dolor, así como de efectos secundarios indeseables. La infusión continua permite mantener concentraciones plasmáticas estables, pero se asocia a un mayor riesgo de depresión ventilatoria, mayor frecuencia de efectos adversos y requiere vigilancia estricta. La PCA es la modalidad más utilizada en la MIRPE a nivel mundial, permite al paciente autoadministrarse dosis preprogramadas de opioides, mejorando la satisfacción y reduciendo retrasos en la analgesia. (48,49)

Los opioides más comúnmente utilizados incluyen la morfina, considerada el estándar de referencia por su eficacia, disponibilidad y duración intermedia, aunque asociada con efectos adversos como náuseas, vómito y estreñimiento. Por su parte, la hidromorfona, de mayor potencia que la morfina y con menor liberación de histamina, reduce el riesgo de prurito y otras reacciones adversas. El fentanilo, por su alta potencia y rápido inicio de acción, ideal para infusiones controladas y manejo inmediato del dolor intenso. (48)

Estos tres opioides son los utilizados con más frecuencia en el postoperatorio inmediato, debido a su perfil analgésico comprobado, versatilidad en diferentes esquemas de administración y amplia experiencia clínica que respalda su eficacia y seguridad. La selección final depende de factores como la edad del paciente, sus comorbilidades, la disponibilidad hospitalaria y la experiencia del equipo médico. (49,53)

A pesar de su eficacia, el uso de opioides intravenosos no está exento de riesgos y limitaciones. Entre los efectos adversos más frecuentes, se incluyen la depresión respiratoria, las náuseas y vómitos postoperatorios, estreñimiento, prurito y la retención urinaria, los cuales pueden interferir con la recuperación y prolongar la estancia hospitalaria (53,54). Asimismo, el uso prolongado puede inducir tolerancia, dependencia física e incluso favorecer fenómenos de hiperalgesia inducida por opioides. (55)

Desde la perspectiva fisiopatológica, los opioides no previenen la sensibilización central ni abordan de forma eficazmente el componente neuropático del dolor. Por lo tanto, no deben administrarse como una estrategia analgésica única. Por estas razones, las guías actuales recomiendan su utilización en combinación con otros analgésicos y técnicas

regionales, dentro de un enfoque multimodal, para maximizar sus beneficios y minimizar los riesgos. (12,35)

### **2.3.1.2. Uso de analgesia controlada por el paciente (PCA)**

El dolor postoperatorio, tras el procedimiento de MIRPE, suele alcanzar niveles elevados especialmente durante las primeras 48 a 72 horas, debido a la combinación de factores nociceptivos y neuropáticos derivados de la manipulación quirúrgica de la pared torácica. Por esta razón, los opioides intravenosos han sido históricamente una de las estrategias más utilizadas para el manejo del dolor agudo postoperatorio. Entre las modalidades de administración disponibles, se encuentran las dosis intermitentes, las infusiones continuas (como las realizadas mediante bombas elastoméricas) y los sistemas de analgesia controlada por el paciente (PCA). (56)

La analgesia controlada por el paciente (PCA, *patient-controlled analgesia*) consiste en un dispositivo electrónico conectado a una vía intravenosa que permite al paciente autoadministrarse bolos preprogramados de opioides según sus necesidades analgésicas. Aunque algunos equipos permiten incluir una infusión basal continua, el beneficio principal de la PCA radica en la posibilidad de que el paciente se administre bolos adicionales mediante un botón, dentro de límites de seguridad como dosis máxima por hora y tiempos de bloqueo (*lockout*). Esta modalidad mejora la satisfacción del paciente al proporcionarle mayor autonomía y control sobre su dolor, reduce los retrasos en la administración de analgesia por parte del personal de salud y ha demostrado optimizar el manejo del dolor postoperatorio agudo. Por lo tanto, se ha consolidado como una estrategia eficaz, tanto como modalidad de tratamiento primaria en ausencia de técnicas regionales como de forma complementaria en protocolos multimodales. (29,49)

Entre los opioides más empleados en los sistemas de PCA, se incluyen la morfina, la hidromorfona y el fentanilo, seleccionados en función de su potencia, duración de acción, perfil de efectos adversos, experiencia clínica del equipo tratante y disponibilidad institucional (29,48). En términos de requerimientos analgésicos durante las primeras 48 a 72 horas posteriores al MIRPE, se ha descrito que el consumo típico de morfina intravenosa oscila entre 0.3 y 0.7 mg/kg/día, mientras que la hidromorfona intravenosa se administra

usualmente en rangos de 0.015 a 0.03 mg/kg/día. De manera global, el consumo acumulado de morfina equivalente (ME) suele situarse entre 20 y 50 mg ME/24 h, con disminuciones significativas cuando se integran técnicas regionales dentro del manejo multimodal. La crioanalgesia intercostal, en particular, ha demostrado reducir los requerimientos de opioides en 40 % a 70 %, alcanzando valores promedio de 15 a 25 mg ME/24 h en las primeras 24 horas postoperatorias. (23,35,57)

Las principales ventajas de la PCA incluyen el control personalizado del dolor, la titulación rápida según demanda, mayor autonomía del paciente, lo cual puede favorecer la participación en fisioterapia respiratoria y movilización temprana. (49) No obstante, su implementación presenta limitaciones asociadas a su correcta utilización. El paciente debe poseer capacidad cognitiva y física suficiente para comprender y accionar el sistema correctamente, lo que restringe su uso en personas con discapacidad intelectual, trastornos del desarrollo, dificultades significativas de comunicación o barreras idiomáticas que no puedan solventarse durante la hospitalización. (58)

Asimismo, una configuración inadecuada puede aumentar el riesgo de sobredosificación accidental si los intervalos *lockout* son inapropiados o de infradosificación en pacientes que evitan utilizar el dispositivo por temor a efectos adversos (53). Su funcionamiento requiere monitorización frecuente para detectar posibles fallos técnicos, evaluar la eficacia analgésica y prevenir errores de programación. Finalmente, requiere formación previa del personal de salud, lo que puede representar una barrera en entornos con recursos limitados. (58)

La evidencia disponible en MIRPE muestra que, aunque la PCA proporciona un alivio adecuado del dolor agudo, su uso exclusivo se ha asociado con mayor consumo total de opioides y una recuperación funcional más lenta en comparación con estrategias multimodales que integran analgésicos no opioides y técnicas regionales (29). Al respecto, evidencia reciente sugiere que la incorporación de fármacos no opioides, como antiinflamatorios no esteroideos y paracetamol, dentro del régimen de PCA, permite reducir significativamente el consumo de morfina, mejorar la calidad de la analgesia y favorecer una movilización más temprana. En algunos centros, esto ha permitido incluso el alta hospitalaria el mismo día del procedimiento en pacientes cuidadosamente seleccionados. (59)

En síntesis, la PCA representa una herramienta eficaz y versátil para el control del dolor postoperatorio intenso en MIRPE (tabla 5), especialmente cuando se integra dentro de un enfoque multimodal que combine fármacos no opioides y, preferentemente, combinación con técnicas de analgesia regional. (56,58)

**Tabla 5.** Resumen comparativo de los esquemas de PCA.

<b>Esquema de PCA</b>	<b>Ventajas principales</b>	<b>Limitaciones</b>	<b>Recomendaciones</b>
PCA exclusiva con opioides	Control eficaz del dolor agudo intenso	Mayor consumo de opioides, más efectos adversos	Solo en pacientes que no toleran AINE o técnicas regionales
PCA con coadministración de AINE o paracetamol	Reducción del consumo total de opioides, mejor tolerancia	Mayor necesidad de coordinación farmacológica	Recomendado como esquema estándar
PCA con técnica regional (e.g. crioanalgesia)	Analgesia más prolongada, menos opioides requeridos	Requiere equipo especializado	Ideal en hospitales con recursos disponibles

*Fuente: elaboración propia con datos de (56,58).*

En el contexto del sistema público de salud costarricense (Caja Costarricense de Seguro Social), el acceso a bombas electrónicas de PCA es limitado y se encuentra disponible únicamente en ciertos centros de alta complejidad. Como alternativa, se cuenta con el uso de bombas elastoméricas, dispositivos mecánicos de infusión continua que no requieren programación electrónica y permiten una liberación sostenida de analgésicos. Aunque no permiten bolos controlados por el paciente, su simplicidad, bajo costo y facilidad de uso las convierten en una herramienta valiosa para mantener niveles plasmáticos estables de opioides en el postoperatorio, especialmente en unidades con recursos limitados o sin personal entrenado en el uso de PCA electrónica.

### **2.3.2. Analgésicos no opioides**

Los analgésicos no opioides constituyen un componente esencial del manejo multimodal del dolor en el procedimiento de MIRPE. Su incorporación permite reducir los requerimientos de opioides, minimizar sus efectos adversos asociados y abordar mecanismos fisiopatológicos distintos, como la inflamación aguda y la sensibilización periférica. (60)

A diferencia de los opioides, cuyo efecto principal es a nivel central, los analgésicos no opioides actúan predominantemente a nivel periférico, modulando la cascada inflamatoria postquirúrgica y disminuyendo la liberación de mediadores nociceptivos. Su administración programada, independientemente de la presencia de dolor intenso, ha demostrado mejorar el confort del paciente, facilitar la movilización temprana y favorecer la recuperación funcional. (46)

En el contexto de MIRPE, los agentes más empleados en esta categoría incluyen los antiinflamatorios no esteroideos (AINE), el paracetamol y, en algunos centros, el metamizol. La elección del fármaco depende de su perfil de seguridad, la disponibilidad y las características del paciente, evaluando de forma individual el riesgo de efectos adversos gastrointestinales, renales o hematológicos. (49,50)

### **2.3.2.1. Antiinflamatorios no esteroideos (AINE)**

Los antiinflamatorios no esteroideos (AINE) constituyen un grupo heterogéneo de fármacos heterogéneos con propiedades analgésicas, antiinflamatorias y antipiréticas. Su característica distintiva es que no pertenecen a la familia de los corticoides, diferenciándose así de los antiinflamatorios esteroideos como la dexametasona o la prednisona. Su uso en el contexto del dolor postoperatorio busca reducir la inflamación local, atenuar la sensibilización periférica de los nociceptores, con el objetivo de mejorar el confort del paciente y disminuir el consumo de opioides. (61)

Los AINE ejercen su acción terapéutica, analgésica y antiinflamatoria, mediante la inhibición reversible de las enzimas ciclooxigenasa COX-1 y COX-2, reduciendo la síntesis de prostaglandinas implicadas en la inflamación, vasodilatación, fiebre y la sensibilización nociceptiva (61). Este mecanismo resulta particularmente relevante en el MIRPE, ya que la manipulación quirúrgica de la pared torácica y la colocación de la barra correctora generan una intensa respuesta inflamatoria local que contribuye significativamente al dolor postoperatorio. (59)

El uso de AINE intravenosos, como ketorolaco, ibuprofeno o diclofenaco, se ha asociado con una reducción significativa en el consumo total de opioides y una mejora del control del dolor tanto en reposo y como durante el movimiento. En pacientes pediátricos y

adolescentes, su administración programada en el postoperatorio inmediato ha demostrado disminuir la necesidad de PCA con morfina y facilitar la movilización temprana. (62)

No obstante, su uso requiere una evaluación individualizada debido a sus posibles efectos adversos. Entre los riesgos más relevantes, se incluyen la alteración de la función renal, la inhibición de la agregación plaquetaria y la irritación de la mucosa gastrointestinal, factores que pueden incrementar la probabilidad de sangrado postoperatorio (63). En individuos con antecedentes de asma o hipersensibilidad a estos fármacos, su administración debe realizarse con precaución debido a la posibilidad de desencadenar broncoespasmo. (64)

La evidencia sugiere que la combinación de AINE con otros analgésicos no opioides, como el paracetamol, potencia el efecto analgésico de forma significativa sin la incidencia de efectos adversos, siempre que se utilicen en dosis y periodos apropiados. (26)

#### **2.3.2.2. Paracetamol y metamizol**

El paracetamol (acetaminofén) es un analgésico y antipirético de uso extendido en el manejo del dolor postoperatorio, especialmente por su favorable perfil de seguridad y bajo riesgo de efectos adversos gastrointestinales o renales en comparación con los AINE. A pesar de ser un medicamento ampliamente utilizado, su mecanismo de acción no está completamente dilucidado, la evidencia sugiere que actúa mediante la inhibición central de una variante de la ciclooxigenasa (COX-3) y la modulación de vías serotoninérgicas, endocannabinoides y descendentes inhibitoras del dolor, reduciendo así la transmisión nociceptiva a nivel medular. (54,65)

La administración intravenosa del paracetamol proporciona un inicio de acción más rápido y concentraciones plasmáticas predecibles, lo que lo convierte en una opción útil en el postoperatorio inmediato, especialmente en pacientes con intolerancia o contraindicación para AINE. Cuando se utiliza de manera programada como parte de un esquema multimodal, el paracetamol ha demostrado reducir el consumo total de opioides, así como mejorar los puntajes de dolor y aumentar la satisfacción del paciente. (50)

El metamizol, también conocido como dipirona, es un analgésico, antipirético y espasmolítico, cuyo mecanismo de acción incluye la inhibición central y periférica de la

síntesis de prostaglandinas, así como la modulación de sistemas nociceptivos dependientes de óxido nítrico y vías endocannabinoides (66). A pesar de que en algunos países su uso está restringido por el riesgo infrecuente de agranulocitosis, continúa empleándose ampliamente en Latinoamérica y gran parte de Europa, debido a su elevada eficacia analgésica y su buena tolerancia cuando se administra por periodos cortos. En regiones donde el fármaco es de uso habitual —como Costa Rica—, la experiencia clínica ha mostrado una incidencia muy baja de reacciones adversas graves, lo que respalda su inclusión dentro de los esquemas multimodales para el manejo del dolor postoperatorio. (67)

En pacientes sometidos a MIRPE, la administración intravenosa de metamizol como parte de un régimen multimodal ha mostrado eficacia comparable a la de los AINE para reducir el dolor y el consumo de opioides, que puede beneficiar a pacientes con mayor componente muscular o espasmo torácico secundario a la manipulación quirúrgica. (66)

En conjunto, la utilización de paracetamol y metamizol dentro de un enfoque multimodal contribuye a una reducción significativa de los requerimientos de opioides, mejora el control del dolor tanto en reposo como durante la movilización y favorece una recuperación funcional más rápida en el postoperatorio del MIRPE (35). En la tabla 6, se muestra una comparación de los analgésicos no opioides en el MIRPE.

**Tabla 6.** Comparación de analgésicos no opioides utilizados en el MIRPE.

Fármaco	Mecanismo de acción principal	Ventajas clínicas	Limitaciones / riesgos	Rol en MIRPE
<b>AINE</b> (ketorolaco, ibuprofeno, diclofenaco)	Inhibición reversible de COX-1 y COX-2 → ↓ prostaglandinas → ↓ inflamación y sensibilización periférica	– Reducción significativa del consumo de opioides – Eficaces para dolor inflamatorio – Mejoran dolor en reposo y movimiento – Disponibles IV para postoperatorio inmediato	– Riesgo de sangrado – Alteración renal – Irritación gástrica – Contraindicados en asma sensible a AINE o enfermedad renal	Primera línea en el manejo multimodal del dolor postoperatorio del MIRPE, si no hay contraindicaciones
<b>Paracetamol</b> (acetaminofén)	Inhibición central (COX-3), modulación	– Excelente perfil de seguridad- No afecta la función plaquetaria	– Hepatotoxicidad en dosis elevadas – Analgesia menos potente si se usa	Componente esencial del esquema multimodal;

Fármaco	Mecanismo de acción principal	Ventajas clínicas	Limitaciones / riesgos	Rol en MIRPE
	serotoninérgica y endocannabinoide	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Útil en pacientes con contraindicación a AINE</li> <li>- - Reduce requerimientos de opioides</li> </ul>	en monoterapia para dolor severo	recomendado de forma programada, especialmente IV en primeras 24 – 48 h
<b>Metamizol (dipirona)</b>	Inhibición central y periférica de prostaglandinas, modulación por NO y vía endocannabinoide ; efecto espasmolítico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Muy eficaz para dolor moderado–severo</li> <li>- Acción espasmolítica útil en dolor muscular/espasm o torácico post-MIRPE</li> <li>- Reducción comprobada de opioides-Excelente tolerancia en cursos cortos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Riesgo muy bajo pero existente de agranulocitosis</li> <li>- No disponible en algunos países</li> <li>- Evitar en pacientes con alergias previas</li> </ul>	Componente valioso del manejo multimodal en países donde está disponible; especialmente útil como complemento de AINE y paracetamol

*Fuente: elaboración propia con datos de (62,64,67).*

### 2.3.3. Coadyuvantes analgésicos

Los medicamentos coadyuvantes forman parte esencial del manejo multimodal del dolor en el MIRPE, ya que potencian la acción de los analgésicos principales y contribuyen a reducir el consumo de opioides. Estos fármacos actúan sobre diferentes vías involucradas en la nocicepción y la sensibilización central, lo que resulta especialmente útil en un procedimiento que combina componentes de dolor nociceptivo, neuropático y muscular. Entre los agentes más utilizados, se incluyen los gabapentinoides, la ketamina en dosis subanalgésicas, la dexametasona y los agonistas  $\alpha$ 2-adrenérgicos como la dexmedetomidina, cada uno con un perfil específico que complementa el control del dolor postoperatorio y favorece la recuperación temprana. (49,50)

#### 2.3.3.1. Gabapentinoides

Los gabapentinoides son análogos estructurales del neurotransmisor inhibidor GABA (*gamma-aminobutyric acid*). Su mecanismo principal consiste en su unión con la subunidad  $\alpha$ 2 $\delta$  de los canales de calcio dependientes de voltaje en las neuronas presinápticas, lo que disminuye la liberación de neurotransmisores excitatorios como el glutamato, noradrenalina

y la sustancia P. Este mecanismo reduce la excitabilidad neuronal y la sensibilización central, procesos clave en la prevención del dolor neuropático postoperatorio. (68)

En cirugía torácica y otras intervenciones asociadas con alto riesgo de dolor mixto, la administración perioperatoria de gabapentina o pregabalina ha demostrado reducir el dolor en reposo y durante el movimiento, además de disminuir de forma significativa el consumo de opioides en las primeras 48–72 horas. (59)

Aunque la evidencia específica para el MIRPE es limitada, diversos estudios en poblaciones comparables, cirugía torácica, cirugía de columna y procedimientos con manipulación nerviosa, sugieren un beneficio potencial en la prevención del dolor crónico postoperatorio, especialmente en pacientes jóvenes en quienes la sensibilización central juega un papel importante (69). Estos hallazgos son relevantes considerando el riesgo de dolor persistente en el procedimiento de Nuss y la afectación directa de estructuras intercostales.

Los efectos adversos más frecuentes incluyen somnolencia, mareo y visión borrosa, los cuales suelen ser dependientes de la dosis. Debido a esto, el uso perioperatorio requiere un equilibrio entre eficacia analgésica y tolerabilidad, favoreciendo dosis moderadas para evitar sedación excesiva que interfiera con la movilización temprana o la fisioterapia respiratoria (70). Por lo tanto, los gabapentinoides constituyen una herramienta valiosa dentro de la analgesia multimodal en cirugías con riesgo de sensibilización central, contribuyendo a un mejor control del dolor agudo y potencialmente disminuyendo la transición hacia dolor crónico postoperatorio. (70)

### **2.3.3.2. Ketamina intravenosa**

La ketamina es un antagonista no competitivo de los receptores N-metil-D-aspartato (NMDA), lo que reduce la transmisión glutamatérgica y limita la sensibilización central. Al mismo tiempo, modula otros sistemas implicados en la nocicepción, como el opioide, monoaminérgico y colinérgico, y atenúa fenómenos de tolerancia e hiperalgesia inducida por opioides. Gracias a estos efectos, la ketamina a dosis subanestésicas se considera un coadyuvante útil en el manejo del dolor agudo postoperatorio y en la prevención de dolor

neuropático persistente, con la ventaja de mantener un perfil hemodinámico estable y una mínima depresión respiratoria. (71,72)

En el contexto perioperatorio, la administración de ketamina a dosis bajas (típicamente bolo de 0,1–0,35 mg/kg seguido de infusión de 0,1–0,3 mg/kg/h durante las primeras 24–48 horas) ha demostrado reducir las puntuaciones de dolor y el consumo total de opioides en cirugías mayores. Las revisiones sistemáticas y guías de consenso coinciden en que, a estas dosis, la ketamina ofrece un efecto analgésico significativo sin eventos adversos graves, aunque pueden presentarse efectos psicomiméticos leves (sueños vívidos, sensación de disociación) y de activación simpática moderada. (72)

Por ello, la ketamina se considera un coadyuvante potencialmente útil en MIRPE, especialmente en pacientes con dolor intenso, tolerancia a opioides o alto riesgo de hiperalgesia, siempre integrada a un protocolo multimodal y valorando cuidadosamente las contraindicaciones (antecedente de psicosis, enfermedad cardiovascular inestable, hipertensión no controlada o hipertensión endocraneana). Su uso perioperatorio ha demostrado prevenir la sensibilización central y mejorar el control del dolor postoperatorio. (50,73)

### **2.3.3.3. Lidocaína intravenosa**

La lidocaína intravenosa actúa principalmente mediante el bloqueo reversible de los canales de sodio dependientes de voltaje en las fibras nerviosas, impidiendo la generación y propagación del potencial de acción. De mismo modo, se le atribuyen propiedades antiinflamatorias y moduladoras de la respuesta inmune incluyendo la reducción de la liberación de citoquinas proinflamatorias y la inhibición de la hiperexcitabilidad neuronal a nivel central, mecanismos que pueden contribuir al alivio del dolor postoperatorio y a la disminución de la sensibilización central. (74)

En cirugía abdominal y torácica, la administración de lidocaína intravenosa en infusión continua (bolo inicial de 1-1,5mg/kg, seguido por 1-2mg/kg/h) se da durante el intraoperatorio y en algunos protocolos, hasta 24 horas del postoperatorio (75). Este método se ha asociado con puntuaciones de dolor, reducción en el consumo de opioides y mejor recuperación gastrointestinal, con menor incidencia de íleo postoperatorio y náuseas. Estos

efectos han motivado su inclusión como parte de estrategias multimodales en cirugía mayor. (76,77)

En el contexto del MIRPE, la experiencia con infusión de lidocaína intravenosa es aún limitada y procede principalmente de extrapolaciones de cirugía abdominal y de pared torácica; sin embargo, su perfil como coadyuvante resulta prometedor, en particular, en pacientes con hiperalgesia postoperatoria o con sospecha de componente neuropático. Su uso requiere monitorización cuidadosa para evitar concentraciones tóxicas, especialmente en pacientes con bajo peso, disfunción hepática o alteraciones de la conducción cardíaca. (74)

#### **2.3.3.4. Sulfato de magnesio**

El sulfato de magnesio ejerce su efecto analgésico principalmente como antagonista no competitivo de los receptores NMDA, reduciendo la entrada de calcio a la neurona y modulando la transmisión nociceptiva. Además, estabiliza de membrana neuronal y reduce la liberación de atenúa la hiperexcitabilidad central, mecanismos que pueden contribuir a disminuir la sensibilización central y potenciar la analgesia en un contexto multimodal. (78)

En cirugía torácica y otros procedimientos mayores, la administración perioperatoria de magnesio (30–50 mg/kg en bolo seguido de 6–20 mg/kg/h en infusión) se ha asociado con menores puntuaciones de dolor postoperatorio, reducción del consumo de opioides y, en algunos estudios, una menor incidencia de hiperalgesia postoperatoria (77). Su perfil de seguridad es favorable cuando se administra con monitorización hemodinámica, aunque deben evitarse dosis elevadas para prevenir hipotensión, bloqueo neuromuscular prolongado y depresión respiratoria. (50)

El magnesio es, por tanto, un coadyuvante potencialmente útil dentro del manejo multimodal del dolor en cirugías de alta intensidad dolorosa, aunque su papel específico en el MIRPE es aún limitado y su uso debe individualizarse según el perfil clínico del paciente.

#### **2.3.3.5. Dexametasona**

La dexametasona es un corticoide sintético de larga duración, con potentes efectos antiinflamatorios e inmunomoduladores, utilizado ampliamente en el contexto perioperatorio. Su acción se basa en la regulación de la expresión génica de múltiples

mediadores inflamatorios, incluyendo la disminución de citoquinas proinflamatorias, como IL-1, IL-6 y TNF- $\alpha$ , la inhibición de la fosfolipasa A2 y la consiguiente reducción en la síntesis de prostaglandinas y leucotrienos. Estos mecanismos contribuyen no solo al control de la inflamación tisular, sino también a la disminución de la sensibilización periférica y central, factores clave en el dolor postoperatorio. (79)

A nivel clínico, la dexametasona se ha utilizado tradicionalmente por su eficacia en la prevención de náuseas y vómitos postoperatorios; sin embargo, múltiples estudios han demostrado, además, un efecto analgésico modesto, pero significativo, especialmente cuando se administra en dosis únicas de 0,05–0,1 mg/kg (habitualmente 4–8 mg en adultos) al inicio del acto anestésico. En cirugía mayor, incluyendo cirugía torácica y ortopédica, su uso se ha asociado con menores puntuaciones de dolor, menor consumo de opioides y mejor confort postoperatorio, sin aumento significativo de complicaciones infecciosas cuando se emplea como dosis única perioperatoria. (80)

En el contexto del MIRPE, la dexametasona puede aportar beneficios duales: por un lado, como antiemético dentro de los protocolos de profilaxis de náuseas y vómitos asociados al uso de opioides; por otro, como coadyuvante analgésico que contribuye a atenuar la respuesta inflamatoria generada por la manipulación de la pared torácica y la colocación de la barra. Su uso es generalmente seguro en pacientes jóvenes sin comorbilidades significativas, aunque debe valorarse con cautela en casos de diabetes *mellitus*, riesgo elevado de infección o úlcera péptica. (79)

#### **2.3.3.6. Dexmedetomidina**

La dexmedetomidina es un agonista altamente selectivo de los receptores  $\alpha_2$ -adrenérgicos, cuyos efectos incluyen analgesia, sedación cooperativa, ansiólisis y disminución de la actividad simpática. Su mecanismo de acción se basa en la inhibición de la liberación de noradrenalina a nivel presináptico y en la modulación de vías descendentes inhibitorias en el asta dorsal de la médula espinal, lo que contribuye a reducir la transmisión nociceptiva y la sensibilización central. A diferencia de otros sedantes, su uso se caracteriza por mantener la estabilidad respiratoria y permitir un estado de sedación superficial y colaborador. (81)

En el perioperatorio, la dexmedetomidina administrada en infusión (típicamente 0.2–0.7  $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{h}$ , opcional con bolo inicial de 0.5–1  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ) ha demostrado disminuir el consumo de opioides, mejorar el control del dolor en reposo y movimiento, reducir la respuesta adrenérgica al estrés quirúrgico y disminuir la incidencia de delirio postoperatorio en algunas poblaciones. En cirugía torácica y procedimientos dolorosos de pared torácica, su efecto como coadyuvante analgésico ha mostrado ser beneficioso, especialmente cuando se integra a protocolos multimodales. (82)

En el MIRPE, la experiencia con dexmedetomidina proviene principalmente de su uso en protocolos para reducir requerimientos de morfina, atenuar espasmos de la pared torácica y mejorar el confort postoperatorio durante la fisioterapia respiratoria. Su perfil hemodinámico, caracterizado por bradicardia y probable hipotensión, requiere monitorización estrecha, especialmente en pacientes pediátricos o adolescentes con tono vagal alto o en quienes reciben otros fármacos depresores del nodo sinusal. Sin embargo, estos efectos adversos suelen ser transitorios y manejables mediante ajustes en la velocidad de infusión. (83)

La dexmedetomidina representa un coadyuvante útil en MIRPE gracias a su capacidad para reducir opioides, mejorar la calidad de la analgesia y proporcionar sedación ligera sin comprometer la ventilación, lo que facilita la movilización temprana y el cumplimiento de ejercicios respiratorios. (82,83)

#### **2.3.4. Estrategias multimodales intravenosas**

El enfoque multimodal en el manejo del dolor postoperatorio del procedimiento de MIRPE se fundamenta en la combinación de diferentes fármacos que actúan sobre múltiples mecanismos fisiopatológicos del dolor, con el objetivo de potenciar la eficacia analgesia y minimizar los efectos adversos asociados a dosis elevadas de un solo agente. Este concepto reconoce que el dolor postoperatorio en cirugía torácica no es exclusivamente nociceptivo, sino que involucra componentes inflamatorios, musculares y neuropáticos, lo que justifica el uso de agentes con diferentes dianas terapéuticas. (29,49)

En el contexto del MIRPE, la analgesia multimodal intravenosa suele incluir un opioide de acción corta o intermedia, analgésicos no opioides administrados de forma

programada y, según el perfil del paciente, uno o más medicamentos coadyuvantes. La administración regular de analgésicos no opioides permite un control basal del dolor, mientras que los opioides se titulan según necesidad, reduciendo así el riesgo de efectos adversos y la exposición acumulada. (48,50)

La evidencia en pacientes sometidos a MIRPE indica que los protocolos multimodales reducen de forma significativa el consumo total de opioides en las primeras 48 horas postoperatorias, mejoran la calidad de la analgesia tanto en reposo como durante el movimiento y favorecen la movilización temprana. Adicionalmente, estos esquemas se han asociado con una menor incidencia de náuseas y vómitos postoperatorios, menor tiempo de estancia hospitalaria y, en casos seleccionados, la posibilidad de alta el mismo día de la cirugía, en pacientes adecuadamente evaluados. (49,50)

El diseño de un protocolo multimodal debe individualizarse en función de la edad del paciente, comorbilidades, alergias, riesgo de sangrado, función renal y hepática, así como de la disponibilidad de fármacos y recursos en el centro hospitalario. Una estrategia eficaz requiere también de una monitorización estrecha para detectar efectos adversos y ajustar las dosis de forma dinámica. La integración de estos protocolos con técnicas de analgesia regional, cuando están disponibles, optimiza aún más los resultados y reduce el riesgo de cronificación del dolor (12,48). En la tabla 7, se detallan los fármacos coadyuvantes utilizados en la analgesia multimodal para el MIRPE.

**Tabla 7.** Coadyuvantes farmacológicos utilizados en la analgesia multimodal para el MIRPE

<b>Fármaco</b>	<b>Mecanismo principal</b>	<b>Dosis típica</b>	<b>Beneficios</b>	<b>Limitaciones</b>
Gabapentinoides (gabapentina / pregabalina)	Unión $\alpha\delta$ $\rightarrow$ $\downarrow$ liberación de glutamato y sustancia P $\rightarrow$ $\downarrow$ sensibilización central	Gabapentina 300–600 mg VO; Pregabalina 75–150 mg VO	$\downarrow$ dolor, $\downarrow$ opioides, posible $\downarrow$ riesgo de dolor crónico	Somnolencia, mareo
Ketamina (dosis bajas)	Antagonista NMDA $\rightarrow$ $\downarrow$ hiperalgesia y sensibilización central	Bolo 0,1–0,3 mg/kg; infusión 0,1–0,3 mg/kg/h	$\downarrow$ dolor, $\downarrow$ opioides, útil en tolerancia a opioides	Efectos psicomiméticos leves, $\uparrow$ TA/FC

<b>Fármaco</b>	<b>Mecanismo principal</b>	<b>Dosis típica</b>	<b>Beneficios</b>	<b>Limitaciones</b>
Lidocaína IV	Bloqueo de canales de sodio + efecto antiinflamatorio	Bolo 1–1,5 mg/kg; infusión 1–2 mg/kg/h	↓ dolor, ↓ opioides, mejor función GI	Riesgo de toxicidad si dosis altas
Sulfato de magnesio	Antagonista NMDA + ↓ entrada de Ca <sup>2+</sup>	Bolo 30–50 mg/kg; infusión 6–20 mg/kg/h	↓ dolor y consumo de opioides	Hipotensión, bradicardia
Dexametasona	Inhibición fosfolipasa A2 + ↓ citoquinas inflamatorias	4–8 mg IV dosis única	Potente antiemético, ↓ dolor leve	Hiperglicemia transitoria
Dexmedetomidina	Agonista $\alpha_2$ → sedación cooperativa + analgesia	Infusión 0,2–0,7 $\mu$ g/kg/h	↓ opioides, sedación sin depresión respiratoria	Bradicardia, hipotensión

*Fuente: elaboración propia con datos de (70,72,73,76,77,79,82).*

### 2.3.5. Anestésicos locales en analgesia regional

Tras haber revisado el uso sistémico de la lidocaína intravenosa, resulta pertinente abordar los anestésicos locales en el contexto de su aplicación local en técnicas de analgesia regional, ya que constituyen el fundamento farmacológico y el componente esencial de los bloqueos de la pared torácica empleados para el manejo del dolor en el MIRPE.

Como se mencionó anteriormente, los anestésicos locales son fármacos que actúan bloqueando de forma reversible los canales de sodio dependientes de voltaje en la membrana neuronal, impidiendo la generación y propagación del potencial de acción. Como resultado, se interrumpe la transmisión de los impulsos nociceptivos desde la pared torácica hacia el sistema nervioso central, lo que proporciona analgesia efectiva y segmentaria. (84)

En cirugía torácica y específicamente en el MIRPE, los anestésicos locales más empleados para bloqueos paravertebrales, intercostales y planos musculares son la bupivacaína, ropivacaína y levobupivacaína, debido a su perfil de larga duración y adecuada relación entre potencia y seguridad. La ropivacaína ofrece menor cardiotoxicidad y un bloqueo motor más limitado en comparación con la bupivacaína, lo que la convierte en una opción frecuente en población pediátrica y adolescente. Por su parte, la levobupivacaína combina una potencia similar a la bupivacaína con un perfil de seguridad superior, siendo una alternativa ampliamente utilizada en técnicas continuas. (85,86)

La duración del efecto analgésico depende de la liposolubilidad, pKa y grado de unión a proteínas plasmáticas de cada fármaco. En general, la bupivacaína y la ropivacaína permiten analgesia prolongada, entre 8 y 18 horas, lo cual resulta especialmente útil para las primeras horas postoperatorias del MIRPE, periodo caracterizado por dolor intenso y riesgo de hipoventilación. La utilización de formulaciones con adrenalina o la colocación de catéteres continuos puede prolongar aún más el efecto analgésico según las necesidades del paciente. (87)

A pesar de sus beneficios, los anestésicos locales presentan riesgos asociados, principalmente relacionados con la toxicidad sistémica por anestésicos locales (LAST), que puede manifestarse con síntomas neurológicos como parestesias, agitación, convulsiones o cardiovasculares, como arritmias y paro cardiovascular. Estos eventos son infrecuentes cuando se respetan las dosis máximas recomendadas, se emplean técnicas guiadas por ultrasonido y se mantiene una monitorización adecuada. Ante sospecha de toxicidad, el tratamiento incluye la administración precoz de emulsión lipídica intravenosa. (88)

En síntesis, los anestésicos locales son un componente esencial de la analgesia regional utilizada en el MIRPE, proporcionando analgesia eficaz y de larga duración, reduciendo de manera significativa el consumo de opioides y mejorando la ventilación y la recuperación postoperatoria. Esta base farmacológica introduce las técnicas que se detallan en el siguiente apartado, donde se abordan los bloqueos regionales más empleados en la corrección quirúrgica del *pectus excavatum*.

#### **2.4. Técnicas de analgesia regional en *pectus excavatum***

El control óptimo del dolor en el procedimiento MIRPE continúa representando un reto para el equipo anestésico. Como se ha mencionado anteriormente, la intensa estimulación nociceptiva generada por la disección subesternal, la tracción de los nervios intercostales, la presión ejercida por la barra correctora y la respuesta inflamatoria resultante, hace que los pacientes experimenten dolor de carácter mixto, con componentes nociceptivos, inflamatorios y neuropáticos. (46)

Las técnicas de analgesia regional se han consolidado como un pilar dentro de las estrategias multimodales, al bloquear de manera selectiva la transmisión selectiva

nociceptiva desde la pared torácica. Su adecuada implementación reduce el requerimiento de analgésicos sistémicos, mejora el confort postoperatorio y disminuye la incidencia de efectos adversos asociados a los opioides, lo que se traduce en una recuperación más rápida y una mayor satisfacción del paciente. (89)

Las técnicas regionales más empleadas incluyen la analgesia epidural torácica, el bloqueo paravertebral torácico, el bloqueo del plano erector de la espina y los bloqueos intercostales o infiltraciones locales en planos musculares. La elección depende de la experiencia del equipo, la disponibilidad de recursos, el perfil de riesgo del paciente y la preferencia institucional. (50)

#### **2.4.1. Analgesia epidural torácica**

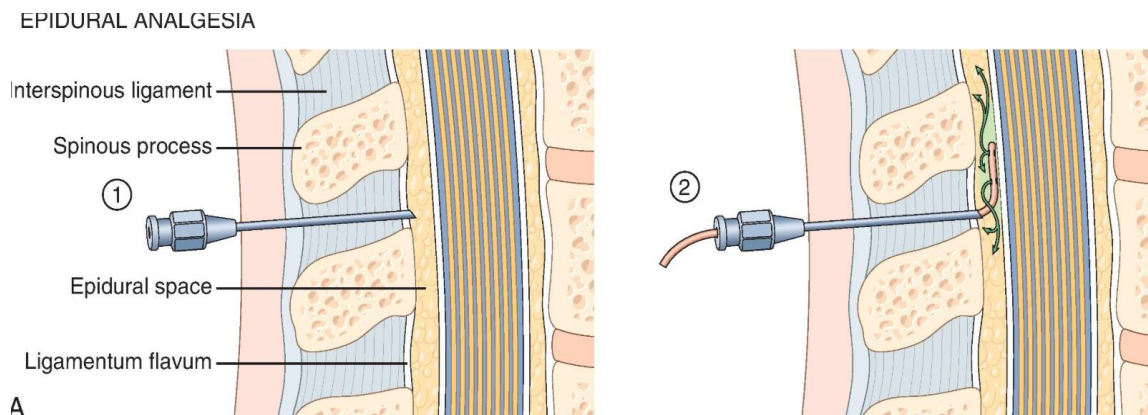
La analgesia epidural torácica (TEA) ha sido considerada durante décadas el *standart of care* en el manejo del dolor postoperatorio de la cirugía torácica mayor. Su eficacia se sustenta en la capacidad de proporcionar un bloqueo segmentario sensitivo, motor y simpático ajustado con precisión al nivel quirúrgico, lo que permite una analgesia profunda y estable. (90)

La técnica consiste en la colocación de un catéter en el espacio epidural a nivel torácico medio, habitualmente entre T4 y T8, con orientación cefálica o caudal según el sitio de incisión (figura 15). A través del catéter se administran de forma continua o en bolos intermitentes anestésicos locales de acción prolongada, como bupivacaína, levobupivacaína o ropivacaína, solos o combinados con opioides lipofílicos. Con la elección de fármacos y concentraciones, se busca un equilibrio entre analgesia efectiva y preservación de la función motora, para facilitar la movilización y la fisioterapia respiratoria. (91)

En cuanto al mecanismo de acción, los anestésicos locales bloquean los canales de sodio dependientes de voltaje en las fibras nerviosas, interrumpiendo la generación y propagación de los impulsos nociceptivos. Al actuar de forma segmentaria, disminuyen la transmisión del dolor en los dermatomas afectados por la incisión y la manipulación quirúrgica. Paralelamente, los opioides administrados por vía epidural actúan sobre los receptores  $\mu$  en el asta dorsal de la médula espinal, inhibiendo la liberación presináptica de neurotransmisores excitatorios, como la sustancia P y el glutamato. La combinación de

ambos fármacos produce un efecto sinérgico que potencia la calidad analgésica y que permite reducir la dosis requerida de cada agente, disminuyendo la incidencia de efectos adversos. (91)

**Figura 15.** Colocación de catéter epidural



Fuente: (92).

En cirugía torácica abierta, múltiples ensayos clínicos y metaanálisis han demostrado que la analgesia epidural torácica proporciona un control del dolor superior tanto en reposo como durante la tos, respiración profunda y la movilización. Este beneficio se traduce en una mayor preservación de la función pulmonar, reducción de complicaciones respiratorias como atelectasias y neumonía, así como disminución del riesgo de fallo ventilatorio. (90,93)

En el contexto del procedimiento MIRPE, el uso de analgesia epidural ofrece un control excelente del dolor durante las primeras 48–72 horas postoperatorias, facilitando la fisioterapia respiratoria y la deambulación temprana. Sin embargo, estudios comparativos recientes sugieren que, aunque la calidad analgésica es adecuada, técnicas más modernas como la crioanalgesia intercostal pueden proporcionar una analgesia más prolongada con menor incidencia de hipotensión, menor necesidad de monitorización intensiva y un riesgo reducido de complicaciones relacionadas con la técnica. (11,29)

A pesar de su eficacia, la analgesia epidural torácica presenta limitaciones importantes. Su colocación requiere un alto grado de habilidad técnica, particularmente en pacientes pediátricos y adolescentes, quienes representan la población predominante en MIRPE. Entre sus posibles complicaciones, se incluyen la hipotensión secundaria al bloqueo

simpático, bradicardia, retención urinaria y el prurito (principalmente asociado al uso de opioides) (26). En casos menos frecuentes, puede presentarse depresión respiratoria, migración del catéter, bloqueo excesivo con síntomas motores, hematoma o absceso epidural y, en casos excepcionales, lesiones neurológicas permanentes. (93)

Está contraindicada en pacientes con coagulopatía, infección local en el sitio de punción, sepsis, hipertensión intracraneal no controlada o anomalías anatómicas significativas de la columna que dificulten el acceso (46). Adicionalmente, el catéter epidural solo puede mantenerse por un periodo limitado debido al riesgo de infección y otras complicaciones asociadas a su permanencia, lo cual es especialmente relevante en MIRPE, donde el dolor puede persistir por varios días e incluso semanas con intensidad significativa. (52)

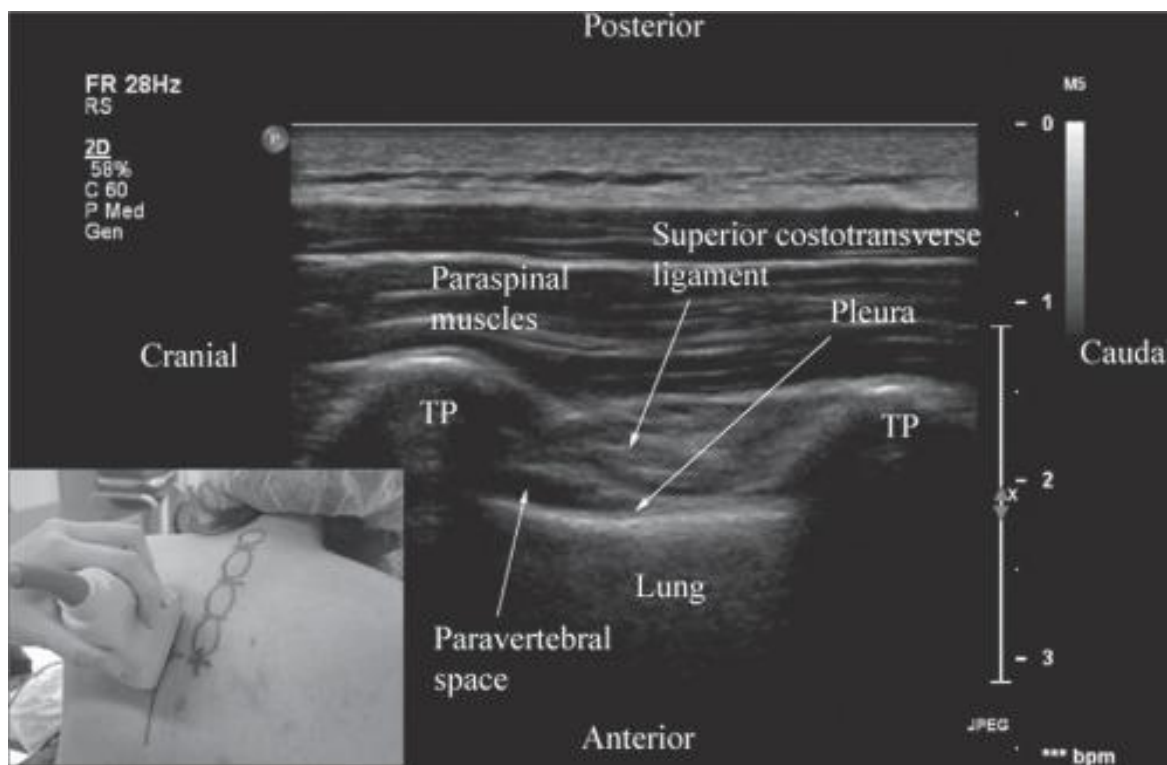
Estas consideraciones, sumadas a la necesidad de vigilancia estrecha en una unidad con personal entrenado, han impulsado la búsqueda de alternativas menos invasivas y con un perfil de seguridad más favorable, como los bloqueos regionales o la crioanalgesia. (11)

#### **2.4.2. Bloqueo paravertebral torácico**

El bloqueo paravertebral torácico (PVB) consiste en la inyección de anestésico local en el espacio paravertebral, adyacente al ganglio simpático y próximo al punto de emergencia del nervio espinal. Este compartimento se comunica con el espacio epidural, por lo que permite un bloqueo sensitivo y simpático segmentario similar a la TEA, pero con menor incidencia de bloqueo motor y un perfil de seguridad más favorable (figura 16). (94).

El mecanismo de acción se basa en la difusión del anestésico local hacia las raíces nerviosas espinales dorsales y ventrales, así como hacia la cadena simpática torácica. Esto produce un bloqueo ipsilateral de las fibras somáticas y simpáticas, disminuyendo tanto el componente somático del dolor como la respuesta neurovegetativa asociada. Esta selectividad unilateral constituye una de sus principales ventajas respecto a la analgesia epidural. (95)

**Figura 16.** Imagen ecográfica oblicua parasagital de la región paravertebral torácica.



*Nota:* TP: Proceso transverso de la vertebra

*Fuente:* (96).

En el contexto del MIRPE, el PVB se ha incorporado con éxito dentro de protocolos multimodales de analgesia perioperatoria. Diversos estudios han reportado reducciones significativas del dolor postoperatorio y del consumo de opioides, especialmente cuando se administra de forma bilateral en niveles torácicos medios. Por su parte, la introducción de la guía ecográfica ha incrementado significativamente la seguridad del procedimiento, al permitir una visualización directa de las estructuras torácicas, reduciendo el riesgo de punción pleural, neumotórax o diseminación inadecuada del anestésico local. (29)

El bloqueo paravertebral presenta limitaciones. Dado que el procedimiento de Nuss genera estimulación bilateral de la pared torácica, se requiere generalmente la realización de bloqueos paravertebrales bilaterales para lograr una cobertura analgésica adecuada. Esto aumenta la complejidad del procedimiento y duplica el número de inyecciones o catéteres necesarios. Cuando se administra como inyección única, la duración del bloqueo depende de las propiedades farmacocinéticas del anestésico local utilizado, lo cual suele ser insuficiente

para cubrir el periodo de mayor intensidad del dolor tras el MIRPE, que frecuentemente se extiende más allá de las primeras 48 horas. (50)

Para prolongar su efecto, es posible la colocación de catéteres paravertebrales bilaterales para infusión continua de anestésicos locales. Sin embargo, esta estrategia incrementa la dificultad técnica, el tiempo de procedimiento y el riesgo de complicaciones, además de requerir personal experimentado y un entorno de monitorización continua. Estas limitaciones han favorecido la búsqueda de alternativas más simples y duraderas, como los bloqueos de planos interfasciales o la crioanalgesia intercostal. (97)

### 2.4.3. Bloqueo del plano erector de la espina

El bloqueo erector de la espina (ESP) es una técnica interfascial relativamente reciente, en la que el anestésico local se deposita en un plano profundo al músculo erector de la espina, sobre las apófisis transversas (figura 17). Desde este espacio, el fármaco se difunde en sentido craneocaudal a lo largo del plano fascial, alcanzando las ramas dorsales y ventrales de los nervios espinales a través de los forámenes intervertebrales, lo que permite un bloqueo analgésico multisegmentario. (98,99)

*Figura 17. Imagen ecográfica de la región del plano del erector de la espina.*



*Nota: TP: Proceso transversal de la vértebra*

*Fuente: (96).*

Entre sus ventajas, destaca que es una técnica más sencilla y con un perfil de seguridad superior al de la analgesia epidural torácica o el bloqueo paravertebral, ya que el punto de punción se encuentra alejado tanto de la médula espinal como de la pleura. Esto reduce significativamente el riesgo de complicaciones graves, como punción dural, hematoma epidural o neumotórax. (98)

Si bien la evidencia específica en MIRPE aún es limitada, diversos reportes clínicos, series de casos y estudios extrapolados de otras cirugías torácicas sugieren una reducción significativa del dolor postoperatorio y del consumo de opioides al emplear el ESP como parte de un manejo multimodal. Su duración supera a la de un bloqueo intercostal aislado, debido a la amplia difusión del anestésico local en el plano fascial. No obstante, sigue siendo dependiente del tipo de anestésico utilizado, su volumen y concentración. (29)

Similar al bloqueo paravertebral, cuando el ESP se realiza como única, su duración analgésica se sitúa generalmente entre 8 y 16 horas, insuficiente para cubrir el periodo de mayor intensidad del dolor tras el MIRPE, que suele extenderse más allá de las primeras 48 horas. Para prolongar los efectos, es posible colocar un catéter para infusión continua. Sin embargo, debido a la estimulación bilateral generada por la barra correctora en el MIRPE, sería necesario colocar catéteres bilaterales para lograr una analgesia adecuada, lo que incrementa la complejidad técnica y los requerimientos de monitorización. (12)

Pese a estas limitaciones, el ESP se considera una alternativa atractiva por su perfil de seguridad, su facilidad técnica y su utilidad dentro de un enfoque multimodal, especialmente en pacientes en quienes la analgesia epidural o el bloqueo paravertebral están contraindicados o cuando se busca minimizar el riesgo de complicaciones.

#### **2.4.4. Bloqueos intercostales e infiltraciones locales**

Los bloqueos intercostales consisten en la inyección de anestésico local alrededor del nervio intercostal, habitualmente bajo visión directa durante el acto quirúrgico. En el MIRPE, estos bloqueos pueden aplicarse en los espacios intercostales correspondientes a las incisiones, a los puntos de entrada de la barra y al trayecto retroesternal, con el fin de disminuir la intensidad del dolor en las zonas sometidas a mayor manipulación mecánica. (100)

En cuanto a las infiltraciones locales, estas consisten en la administración de anestésico local en tejidos subcutáneos, musculatura y planos fasciales en el sitio de incisión o disección. Estas técnicas son sencillas, rápidas y pueden realizarse sin necesidad de equipo especializado, lo que las convierte en un complemento útil dentro de estrategias multimodales de analgesia perioperatoria. (86,101)

Si bien es posible colocar catéteres intercostales para infusión continua, esta estrategia enfrenta importantes limitaciones prácticas. Debido al carácter bilateral del procedimiento de MIRPE y al número de dermatomas involucrados, sería necesario insertar múltiples catéteres de forma bilateral para lograr una cobertura analgésica adecuada. Esto incrementa de manera significativa la complejidad técnica, el tiempo quirúrgico y el riesgo de complicaciones, como punción pleural, hemotórax, formación de hematomas y toxicidad sistémica por anestésicos locales. Por estas razones, los bloqueos intercostales y las infiltraciones locales se emplean principalmente como complementos dentro de un esquema multimodal, más que como técnicas primarias de analgesia en el MIRPE. (102,103). En la tabla 8, se muestra una comparación de técnicas de analgesia regional en el MIRPE.

**Tabla 8.** Comparación de técnicas de analgesia regional en el MIRPE.

Técnica	Sitio de inyección	Difusión / Efecto	Ventajas	Limitaciones	Duración
TEA (Analgésico Epidural Torácico)	Espacio epidural torácico (T4–T8)	Bloqueo bilateral sensitivo + simpático	Analgésico muy efectiva; mejora función respiratoria	Técnica compleja; más efectos adversos; requiere monitorización	24–72 h con infusión
PVB (Bloqueo Paravertebral Torácico)	Espacio paravertebral junto a raíz espinal	Bloqueo unilateral; posible difusión epidural	Similar eficacia a TEA con menor hipotensión	Requiere bilateralidad en MIRPE; duración limitada	8–16 h
ESP (Bloqueo del Plano Erector de la Espina)	Plano profundo al músculo erector, sobre apófisis transversa	Difusión craneocaudal amplia	Fácil y seguro; alejado de pleura y canal	Evidencia limitada en MIRPE; duración insuficiente sola	8–16 h
Bloqueos intercostales / infiltración local	Alrededor del nervio intercostal o en tejidos del sitio quirúrgico	Limitada al dermatoma infiltrado	Sencillos, analgesia inmediata	Duración muy corta; múltiples punciones requeridas	4–12 h

Fuente: elaboración propia con datos de (89,96,99–101,104–106).

## **2.5. Fundamentos de la crioanalgesia: mecanismos de acción, evidencia clínica, ventajas y limitaciones**

La reparación mínimamente invasiva del *pectus excavatum* (MIRPE), o técnica de Nuss, se caracteriza por generar un dolor postoperatorio particularmente intenso y multifactorial, derivado de la compresión, desplazamiento y elevación de la caja torácica requeridos para corregir la deformidad. Como se ha expuesto detalladamente en capítulos anteriores, este dolor involucra mecanismos nociceptivos, inflamatorios y neuropáticos, además, representa uno de los principales retos perioperatorios en estos pacientes. (107)

Aunque se han utilizado diversas estrategias analgésicas —opioides, AINE y técnicas regionales como la epidural torácica y los bloqueos paravertebrales—, persiste un vacío en el control óptimo del dolor tras MIRPE, debido a las limitaciones y riesgos de los métodos tradicionales.

En este escenario, surge la crioanalgesia de los nervios intercostales como una técnica regional prometedora, capaz de proporcionar analgesia prolongada mediante la interrupción temporal de la conducción nerviosa. Su creciente adopción en los últimos años ha renovado el interés en optimizar el manejo del dolor en MIRPE (31). Por lo que este apartado revisa de forma integral los fundamentos, técnica y evidencia clínica de la crioanalgesia, así como sus ventajas, limitaciones y controversias actuales.

### **2.5.1. Fundamentos fisiológicos y mecanismo de acción de la crioanalgesia**

La crioanalgesia (o crioneuroablación) actúa mediante la aplicación de temperaturas extremadamente bajas, por lo general entre  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sobre un nervio periférico para producir una lesión neuronal reversible que interrumpe la transmisión nociceptiva. El frío intenso incide a la degeneración walleriana del axón y de la vaina de mielina, provocando un bloqueo de la conducción nerviosa similar al de los anestésicos locales (9). A diferencia de la neurolisis química o la sección quirúrgica, la crioablación preserva la integridad estructural del nervio, por lo que el endoneuro, perineuro y epineuro permanecen intactos (108). Esto permite que, con el tiempo, el axón regenere a través del “túnel” endoneural a una velocidad de  $\sim 1\text{--}2\text{ mm por día}$ , restableciendo gradualmente la función sensitiva en el territorio afectado. (108)

En la práctica clínica, la analgesia obtenida mediante crioablación de los nervios intercostales se prolonga durante varias semanas e incluso meses, hasta que las fibras nerviosas regeneran su continuidad con los receptores periféricos. La recuperación funcional completa es habitual y suele alcanzarse entre los 3 y 6 meses posteriores al procedimiento, dependiendo principalmente de la extensión del segmento nervioso afectado (109). Además, estudios clínicos en MIRPE muestran que ~85% de los pacientes recuperan la sensibilidad torácica normal antes de 9 meses y >98% a ~12 meses. (110)

A nivel fisiológico, la crioanalgesia intercostal logra un bloqueo sensitivo segmentario de larga duración sin requerir catéteres ni infusiones continuas. El efecto analgésico puede mantenerse por, al menos, dos meses tras una aplicación adecuada, lo que coincide con el periodo de mayor dolor postoperatorio del MIRPE, normalmente más intenso durante las primeras 4–6 semanas. (111)

Es importante destacar que, durante la fase de regeneración axonal, pueden ocurrir fenómenos transitorios de hipersensibilidad. Aproximadamente 20% de los pacientes experimentan cierta hipersensibilidad cutánea al recuperarse la inervación, por ejemplo: hipersensibilidad al tacto en la zona pectoral, que suele aparecer alrededor de los tres meses y resolverse espontáneamente en el transcurso de un mes (110). Solo un pequeño porcentaje, del 5 al 6% de los pacientes, refiere que estas sensaciones son dolorosas; en dichos casos, pueden manejarse eficazmente con neuromoduladores como gabapentina o con fármacos tópicos como capsaicina hasta su resolución.

En las series publicadas no se ha identificado desarrollo de dolor neuropático crónico refractario atribuible a la crioablación intercostal. En resumen, la técnica produce una neuropraxia reversible inducida por frío, que brinda analgesia prolongada con un riesgo muy bajo de secuelas permanentes. (112)

Desde el punto de vista histórico, la crioterapia con fines analgésicos tiene antecedentes en cirugía torácica abierta desde los años 1970–1980, aunque su uso decayó por la inconsistencia de resultados y preocupación por complicaciones neurológicas. La reciente generación de dispositivos más precisos y la necesidad de optimizar protocolos de

recuperación post-pectus han revitalizado el interés por la crioanalgesia como parte de estrategias Enhanced Recovery After Surgery (ERAS) en cirugía torácica pediátrica.

### **2.5.2. Aspectos técnicos y modalidades de aplicación de la crioanalgesia intercostal**

La crioanalgesia intercostal es una técnica de neuromodulación basada en la inducción controlada de la axonotmesis reversible mediante la aplicación de frío extremo sobre el nervio intercostal. Su fundamento fisiológico radica en la degeneración walleriana, proceso en el cual el segmento axonal distal a la lesión sufre desintegración estructural mientras se preservan el endoneuro y el epineuro, permitiendo una regeneración organizada y, por tanto, una recuperación funcional completa tras varias semanas o meses.

Diversos estudios experimentales y clínicos han demostrado que la aplicación de temperaturas inferiores a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  produce interrupción de la conducción axonal, mientras que rangos entre  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  aseguran una degeneración walleriana predecible sin daño permanente en las capas de soporte neural. (108,113)

Desde el punto de vista físico, la técnica se basa en el efecto Joule–Thomson, mediante el cual la expansión rápida de gases como dióxido de carbono u óxido nitroso dentro del criosonda provoca un descenso abrupto de la temperatura en la punta del dispositivo. Este enfriamiento genera la formación de un *ice-ball* que engloba el nervio objetivo y determina la magnitud del daño axonal. La eficacia del proceso depende de la estabilidad del contacto entre la sonda y nervio, del gradiente térmico alcanzado y del tiempo de exposición. (9)

En la práctica clínica, los ciclos suelen oscilar entre 60 y 120 segundos por nivel, con una temperatura efectiva cercana a  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , parámetros que han mostrado producir un bloqueo sensitivo prolongado y confiable (26). Aunque algunos estudios experimentales sugieren que ciclos de un minuto podrían ser suficientes para inducir la injuria axonal, la mayoría de los centros continúa utilizando ciclos de dos minutos para garantizar la consistencia del efecto analgésico.

En relación con las estructuras vasculares, la aplicación de frío extremo genera un fenómeno de vasoconstricción refleja en la arteria y vena intercostales, lo que reduce transitoriamente el flujo sanguíneo sin producir daño estructural permanente. Estudios

histológicos demuestran que, a las temperaturas empleadas para crioanalgesia ( $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), el endotelio vascular tiende a conservarse intacto, evitando necrosis o trombosis significativa (114). No obstante, el *ice-ball* puede inducir un vasoespasmo reversible, motivo por el cual se recomienda evitar el contacto directo y mantener la sonda aplicada exclusivamente sobre el nervio, orientándola perpendicular a la cara inferior de la costilla. Cuando se siguen estos principios técnicos, la probabilidad de lesión vascular clínicamente relevante, incluyendo sangrado, trombosis o compromiso de perfusión, es extremadamente baja, como lo reflejan las series clínicas contemporáneas de crioanalgesia intercostal. (115)

Estos principios técnicos son aplicables tanto al abordaje toracoscópico intraoperatorio, actualmente el más utilizado en el MIRPE, como al abordaje percutáneo guiado por imágenes, cada uno con particularidades en su vía de acceso, requerimientos anestésicos y consideraciones logísticas. En las siguientes subsecciones, se describen en detalle ambos métodos y, posteriormente, se presenta una comparación de sus ventajas, limitaciones y evidencia disponible.

#### **2.5.2.1. Crioanalgesia intraoperatoria bajo visión directa toracoscópica**

El abordaje toracoscópico constituye la técnica estándar para la aplicación de crioanalgesia intercostal en el MIRPE, dado que permite identificar con precisión el trayecto del nervio intercostal y asegurar un posicionamiento óptimo de la criosonda bajo visualización directa (figura 18). El procedimiento se realiza utilizando las incisiones propias del procedimiento de Nuss o por puertos toracoscópicos adicionales, a través de los cuales se introduce la óptica y el instrumental de crioterapia. Para obtener una adecuada exposición del espacio subcostal posterior y visualizar el paquete vasculonervioso, es necesario implementar la ventilación unipulmonar, ya sea mediante tubo de doble lumen, intubación selectiva guiada por broncoscopía o el uso de bloqueadores endobronquiales. Este paso facilita el colapso controlado del pulmón ipsilateral, ampliando el campo de visión y disminuyendo el riesgo de lesión accidental durante la maniobra. (26)

**Figura 18.** Portal de acceso extrapleurales con introducción de la óptica toracoscópica.

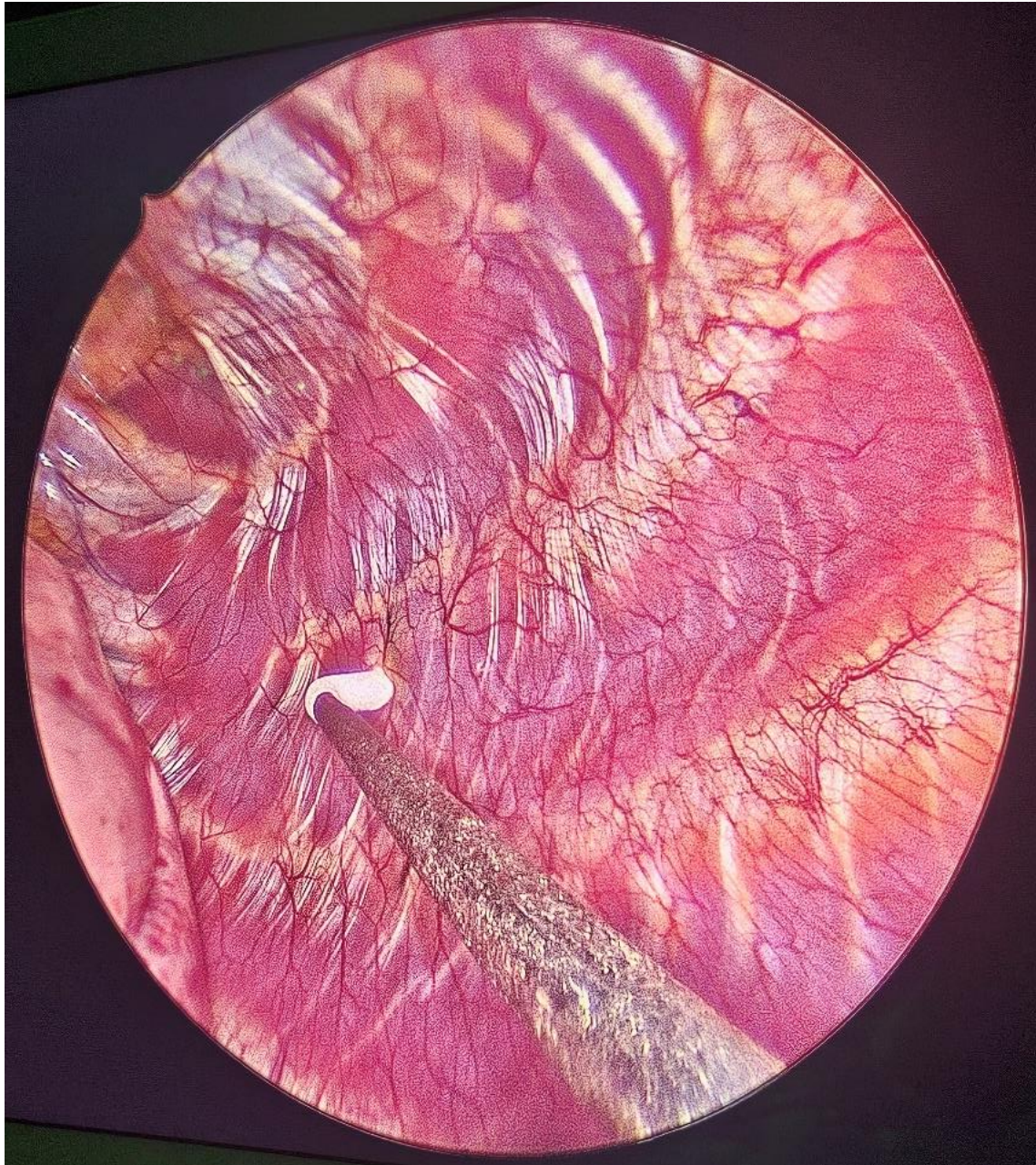


*Fuente: fotografía tomada por el autor (Hospital Rafael Ángel Calderón Guardia, 2025)*

Una vez expuesto el espacio intercostal, la sonda de crioterapia se orienta perpendicularmente a la cara inferior de la costilla, localización anatómica donde discurre el nervio intercostal en íntima relación con la arteria y vena intercostales. La punta de la criosonda debe colocarse en contacto directo con el tejido neural, evitando presionarlo contra el hueso costal o acercarlo en exceso al parénquima pulmonar. La eficacia de la crioablación

depende de la estabilidad del contacto durante el ciclo de congelación, de forma que la transferencia térmica sea homogénea y permita la formación adecuada del *ice-ball* alrededor del nervio (figura 19). Finalizado el ciclo, se activa la fase de descongelación, que separa el tejido de la punta del probe sin generar tracción mecánica que pudiera dañar estructuras adyacentes. (113)

**Figura 19.** Generación del ice ball en la superficie costal durante crioanalgesia intercostal.



Los niveles anatómicos seleccionados para la crioablación dependen de la distribución del dolor esperada y la posición de la barra metálica. En la mayoría de los centros se tratan nervios intercostales T3 a T8 de forma bilateral, lo que abarca los dermatomas sometidos a mayor tensión durante la corrección del pectus. En la serie de DiFiore et al (110), la crioablación se aplicó dentro del rango T3–T8 en ambos hemitórax, lo que en la práctica correspondió a aproximadamente cinco niveles por lado, similar a lo reportado en el ensayo multicéntrico COPPER (107), donde se trataron 10 nervios intercostales en total (cinco por hemitorax). Esta consistencia entre centros confirma que la mayoría de los protocolos contemporáneos emplean entre 4 y 6 niveles por lado, ajustando la selección según la altura de la barra y la anatomía del paciente.

En términos logísticos, la incorporación de la crioanalgesia toracoscópica suele incrementar el tiempo quirúrgico en 30–40 minutos, variación asociada al número de niveles tratados, la necesidad de ventilación unipulmonar y la curva de aprendizaje del equipo quirúrgico. Esto exige una coordinación estrecha entre cirujano y anestesiólogo para programar la secuencia de colapso pulmonar, aplicación del crioterapia y reexpansión al finalizar la técnica. (116)

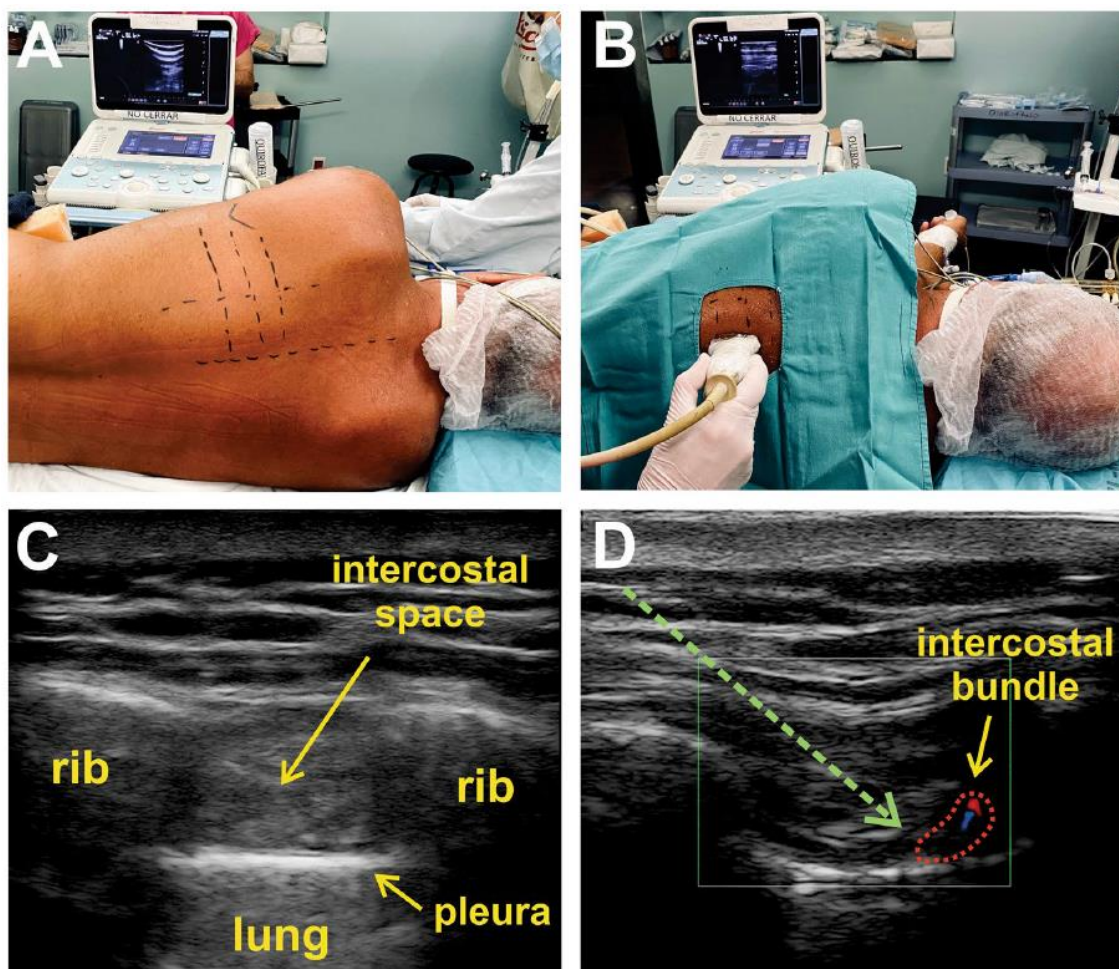
Finalmente, existen consideraciones de seguridad inherentes al procedimiento. Entre ellas destacan: evitar la transmisión de frío a estructuras no objetivo (pulmón, pleura parietal o piel), proteger vasos intercostales para prevenir vasoespasmo o lesión térmica y mantener normotermia mediante medidas activas de calentamiento, especialmente en pacientes pediátricos susceptibles a pérdida de calor. Cuando se siguen estos principios, la literatura reporta una incidencia muy baja de complicaciones mayores relacionadas con la aplicación del frío durante el MIRPE. (113)

#### **2.5.2.2. Crioanalgesia percutánea guiada por ultrasonido**

El abordaje percutáneo guiado por imágenes constituye una alternativa mínimamente invasiva para la aplicación de crioanalgesia intercostal y ha cobrado interés en el contexto del MIRPE debido a su capacidad para proporcionar analgesia prolongada sin necesidad de toracoscopia o ventilación unipulmonar. Esta técnica se basa en la introducción de una

criosonda a través de la piel, dirigiéndolo hacia el espacio extrapleurales o retropleural para posicionar su punta en proximidad al nervio intercostal objetivo. (111)

**Figura 20.** A. Posición del paciente y marcación de los espacios intercostales; B. Colocación del transductor, C. Reconocimiento del del espacio intercostal; D. Identificación Doppler del paquete neurovascular



Fuente:(117).

La localización anatómica se logra mediante ecografía de alta resolución o tomografía computarizada, lo que permite identificar con precisión la trayectoria del nervio y del paquete vasculonervioso, así como descartar interposición de estructuras que pudieran aumentar el riesgo de complicaciones (figura 20). Su ejecución es llevada a cabo habitualmente con un equipo de anestesiología o radiología intervencionistas entrenado en técnicas guiadas por imagen. La literatura indica que este abordaje es técnicamente factible y seguro cuando se realiza bajo guía ecográfica o tomográfica adecuada, manteniendo tasas de complicaciones

bajas y un perfil analgésico comparable al de otras técnicas neuroablativas en cirugía torácica. (117)

En el contexto del MIRPE, la crioanalgesia percutánea puede aplicarse el mismo día de la cirugía o de forma anticipada, típicamente entre 24 y 48 horas antes, con el fin de que la degeneración axonal iniciada durante la crioablación esté plenamente establecida al momento de la agresión quirúrgica. Esta anticipación se fundamenta en la fisiología del bloqueo por frío, ya que el efecto analgésico no depende de un bloqueo inmediato, sino de la interrupción progresiva de la conducción nerviosa a medida que avanza la degeneración walleriana. (111)

En consecuencia, cuando la crioanalgesia se realiza uno o dos días antes del MIRPE, el paciente afronta la manipulación torácica con un estado ya consolidado de hipoestesia segmentaria, lo que se traduce en una reducción del dolor postoperatorio temprano y menor necesidad de analgesia sistémica. Algunos grupos han reportado que esta estrategia permite una planificación más precisa del control del dolor y puede integrarse de forma efectiva dentro de protocolos de recuperación acelerada (ERAS) que priorizan la movilización temprana, el uso reducido de opioides y la optimización de la estancia hospitalaria. (118)

La evidencia disponible, aunque aún limitada en el ámbito específico del MIRPE, sugiere beneficios clínicos relevantes. En series donde la crioanalgesia percutánea se aplicó antes de la cirugía, se observó menor duración del uso de analgesia controlada por el paciente, reducción significativa en la puntuación de dolor en las primeras horas postoperatorias, así como una estancia hospitalaria más corta, en comparación con la aplicación el mismo día de la operación. Estos hallazgos apuntan a que la instauración precoz del bloqueo intercostal optimiza el perfil analgésico y puede disminuir la necesidad de rescates opioides. (7)

Además, se ha descrito que la técnica de crioanalgesia percutánea requiere tiempos de ejecución variables, con duraciones entre 55 y 127 minutos dependiendo del número de niveles tratados, la experiencia del operador y el método de imagen utilizado; sin embargo, este tiempo se realiza fuera del quirófano principal, por lo que no afecta directamente la duración del MIRPE y puede planificarse en un entorno ambulatorio o en sala de procedimientos guiados por imagen. (7)

Entre las ventajas más destacadas del abordaje percutáneo, se encuentra la posibilidad de establecer analgesia de forma previa al procedimiento quirúrgico, evitando así el incremento de tiempo intraoperatorio y la complejidad asociada a la ventilación unipulmonar requerida por la técnica toracoscópica. Asimismo, al tratarse de un procedimiento mínimamente invasivo y focalizado, puede realizarse en pacientes con vía aérea difícil o en aquellos en quienes se desea minimizar la manipulación bronquial. (117)

No obstante, presenta limitaciones importantes, pues exige realizar un procedimiento adicional antes de la cirugía, requiere disponibilidad de equipos de imagen adecuados y operadores con experiencia, también presenta una curva de aprendizaje para asegurar la colocación óptima de la sonda sin riesgo de perforación pleural o lesión vascular. Además, aunque los resultados preliminares son prometedores, la evidencia aún se basa mayoritariamente en series pequeñas y estudios observacionales, por lo que se requieren ensayos clínicos más amplios para establecer con mayor solidez su eficacia y seguridad a largo plazo. (111) En la tabla 9, se lleva a cabo una comparación entre abordaje toracoscópico intraoperatorio y abordaje percutáneo guiado por imágenes en crianalgesia intercostal.

**Tabla 9.** Comparación entre abordaje toracoscópico intraoperatorio y abordaje percutáneo guiado por imágenes en crianalgesia intercostal

<b>Aspecto</b>	<b>Toracoscópico intraoperatorio</b>	<b>Percutáneo guiado por imágenes</b>
Momento de aplicación	Durante el MIRPE, posterior a la colocación de la barra.	Antes del MIRPE (24–48 h) o el mismo día.
Vía de acceso y guía	Toracoscopia con visión directa del nervio.	Vía extrapleural/retropleural guiada por US de alta resolución (10–15 MHz) o TC.
Requerimientos anestésicos	Requiere ventilación unipulmonar e intubación con doble lumen o bloqueador bronquial.	No requiere ventilación unipulmonar; puede realizarse bajo sedación o anestesia ligera.
Impacto en tiempos quirúrgicos	Añade 30–40 minutos al MIRPE al realizar la criointraoperatoria.	No prolonga el MIRPE; se ejecuta fuera de quirófano.
Ventajas principales	Precisión anatómica por visión directa; control completo del campo quirúrgico.	Analgesia instaurada previamente; evita OLV; reduce tiempos operatorios; alta utilidad en protocolos modernos.

<b>Aspecto</b>	<b>Toracoscópico intraoperatorio</b>	<b>Percutáneo guiado por imágenes</b>
Limitaciones principales	Mayor complejidad técnica y anestésica; requiere colapso pulmonar.	Necesita equipo de imagen avanzado y operador entrenado; implica un procedimiento adicional.
Adecuación para ERAS	Buena, pero aumenta el tiempo operatorio y complejidad anestésica.	Excelente, facilita analgesia anticipada, reduce el uso de opioides y optimiza la recuperación postoperatoria.
Evidencia clínica	Amplia experiencia y múltiples estudios en MIRPE.	Evidencia emergente con resultados preliminares favorables.

*Fuente: elaboración propia con datos de (100,107,109,110,117,118).*

### **2.5.3. Evidencia clínica sobre la eficacia analgesia, consumo de opioides, recuperación y dolor crónico**

La evidencia clínica acumulada, la cual incluye: estudios controlados, series observacionales, revisiones sistemáticas y datos multicéntrico, sostiene que la crioanalgesia intercostal es una estrategia eficaz y segura para el control del dolor tras el procedimiento de MIRPE. En múltiples reportes, la técnica ha demostrado proporcionar analgesia sostenida y reducción significativa del consumo de opioides postoperatorios. Por ejemplo, en el metaanálisis de Intercostal Nerve Cryoablation During Pectus Excavatum Repair (2024), que incluyó más de 13.000 pacientes de 32 estudios comparativos, la crioanalgesia se asoció con una disminución estadísticamente significativa tanto en la longitud de hospitalización como en el consumo de opioides, con una reducción media de 186 mg equivalentes de morfina para pacientes que recibieron crioterapia versus quienes no la recibieron. (119)

En cuanto a la duración de la estancia hospitalaria, la misma revisión mostró que la crioanalgesia reduce en promedio cerca de 1.8 días la hospitalización post-MIRPE. (119,120). Además, estudios seriados y revisiones previas coincidían con estos hallazgos: la crioanalgesia intercostal, al ofrecer analgesia prolongada, permite un alta más temprana, favorece la movilización precoz y reduce la necesidad de analgesia invasiva continua, como la TEA. (120,121)

En cuanto a la seguridad y la recuperación funcional, las series publicadas reflejan un perfil favorable: en el estudio piloto descrito por A New Device for Thoracoscopic Cryoanalgesia in Pectus Excavatum Repair, no se reportaron complicaciones atribuibles directamente a la crioanalgesia y los pacientes alcanzaron un buen control del dolor con

requerimientos mínimos de rescate analgesia y alta relativamente precoz (120). Por su parte, estudios más recientes también describen que la incorporación de la crioanalgesia dentro de un esquema multimodal permite reducir o eliminar PCA, sin comprometer la analgesia postoperatoria. (122)

Si bien la evidencia sobre dolor crónico a largo plazo post-MIRPE es más limitada, los datos disponibles resultan tranquilizadores: en las cohortes seguidas hasta al menos un año no se ha descrito una incidencia elevada de dolor neuropático persistente atribuible a la crioanalgesia y la mayoría de las molestias transitorias fueron autocontenidas y manejables. (120,123)

En síntesis, y como se resume en la tabla 10, la crioanalgesia intercostal en el contexto del MIRPE demuestra una combinación sólida de eficacia analgésica, reducción de opioides, menor estancia hospitalaria, perfil de seguridad aceptable y potencial para mejorar la recuperación funcional, lo que la posiciona como una componente valiosa en protocolos modernos de analgesia multimodal.

**Tabla 10.** Evidencia clínica de la crioanalgesia en MIRPE

<b>Autor (año)</b>	<b>Diseño (comparación)</b>	<b>N (crio vs control)</b>	<b>Resultados principales (verificados)</b>
Graves et al. (2019) PubMed ID: 30773220	Ensayo clínico RCT (Crio vs Epidural)	20 (10 vs 10)	Estancia mediana <b>3 vs 5 días</b> ( $-2$ días, $p<0.001$ ). <b>-416 mg</b> de MOR total ( $p<0.001$ ). <b>52–82% menor consumo de opioides POD1–3</b> . Sin diferencias significativas en puntajes de dolor ni en complicaciones.
Arshad et al. (2021) PubMed ID: 33676242	Cohorte emparejada (NSQIP, propensity-matched)	35 vs 140	Crio asociada a <b>reducción de LOS ajustada <math>\approx 1.3</math> días</b> ( $p<0.001$ ). Sin diferencias en complicaciones, reoperaciones ni reingresos. Apoyo fuerte para protocolos ERAS.
Song et al. (2022) PubMed ID: 35605979	Estudio retrospectivo comparativo (Crio vs Epidural)	46 (23 vs 23)	Grupo crio con <b>menor dolor agudo, menor consumo de opioides (MME totales) y estancia más corta</b> . Epidural mostró más fallas técnicas. Crio considerada superior en eficacia y simplicidad.
Clark et al. (2022) PubMed ID: 34857427	Serie retrospectiva (antes vs después)	161 (75 vs 86)	Implementación de crio redujo LOS <b>de 4 a 2 días</b> . Crio fue <b>el único predictor de estancia corta</b> . Significativa reducción de consumo total de opioides (PCA, IV y VO). Sin aumento en dolor promedio. <b>Menos complicaciones postoperatorias</b> en el grupo crio.
Toselli et al. (2024) PubMed ID: 38363276	Cohorte retrospectiva estandarizada	221 (176 vs 45)	Los media <b>1.4 vs 3.6 días</b> ( $p<0.0001$ ). Requerimiento opioide mediano <b>7.5 vs 77.4 mg OME</b> ( $p<0.0001$ ). $>90\%$ de altas en POD2. Destacan <i>“lessons learned”</i> :

	(Crio vs Epidural est.)		correcta aposición de sonda, evitar congelar hueso, educación y soporte multidisciplinario.
COPPER Trial (Disma et al., 2025*)	Ensayo clínico RCT (Crio vs Epidural)	88 (45 vs 43)	Resultados preliminares reportados en congresos: <b>calidad de vida a 14 días similar</b> entre grupos (PedsQL, diferencia no significativa). Crio mostró <b>inicio analgésico retardado (24–48 h)</b> , pero mejor analgesia desde POD2 con transición temprana a VO y movilización. <b>Sin diferencias en complicaciones</b> ni secuelas a corto plazo. Señala necesidad de analgesia puente en primeras 24 horas. ( <i>Aún sin publicación definitiva</i> )

*Notas: LOS = estancia hospitalaria; OME = equivalentes de morfina oral; POD = día postoperatorio.*

*Fuente: elaboración propia con datos de (31,107,111–113,124).*

#### 2.5.4. Ventajas de la crioanalgesia

La crioanalgesia intercostal presenta múltiples ventajas frente a otras modalidades analgésicas empleadas en el MIRPE, destacándose su efecto prolongado, el cual es capaz de extenderse por varias semanas y cubrir el periodo álgido de dolor postoperatorio. Lo que la diferencia de técnicas como la analgesia epidural, los bloqueos paravertebrales o los bloqueos de plano muscular erector de la espina, cuyo efecto se limita a horas o pocos días tras retirar el catéter. Esta prolongación analgésica disminuye el riesgo de intensificación del dolor una vez dado de alta el paciente y reduce la necesidad de intervenciones adicionales. (27,113)

Otra ventaja significativa es su excelente perfil de seguridad. Al no requerir catéteres ni infusiones continuas, se eliminan riesgos como infección, sepsis, desplazamiento del catéter, hematoma epidural, retención urinaria, hipotensión o intoxicación sistémica por anestésicos locales. Diversos estudios comparativos muestran que la crioanalgesia tiene menos complicaciones que la TEA, y no se han reportado eventos graves directamente atribuibles a la técnica en MIRPE. (112)

Al realizarse bajo visión toracoscópica directa, la colocación de la criosonda es altamente precisa, lo que permite aplicar la energía directamente sobre el nervio intercostal objetivo minimizando el riesgo de lesión de estructuras adyacentes. Esta precisión contribuye a una mayor reproducibilidad y a una analgesia más consistente entre pacientes. (26,49)

Desde el punto de vista clínico, múltiples estudios han demostrado reducciones significativas en el consumo total de opioides y en la duración de la estancia hospitalaria,

comparado con otras modalidades analgésicas. La menor utilización de opioides conlleva beneficios adicionales, incluyendo menor incidencia de náuseas, vómitos, íleo paralítico y depresión respiratoria. Asimismo, la analgesia estable favorece un postoperatorio más confortable y eficiente. (57)

El control del dolor más estable también favorece la movilización temprana y la recuperación funcional acelerada. Los pacientes pueden iniciar antes la fisioterapia respiratoria y la deambulación, reduciendo complicaciones pulmonares como atelectasias e infecciones. La ausencia de un catéter epidural facilita este proceso, permitiendo que los pacientes se movilicen sin restricciones físicas y sin riesgo de bloqueo motor. (125)

La técnica ha mostrado eficacia en diferentes perfiles de pacientes, tanto pediátricos como adultos, incluyendo aquellos con mayor rigidez torácica o alteraciones anatómicas más complejas. Su versatilidad se suma a la compatibilidad con estrategias multimodales de analgesia, pudiendo complementarse con bloqueos de acción inmediata durante las primeras 24–48 horas hasta que la crioanalgesia alcanza su efecto máximo. (122)

Finalmente, la reducción de estancias hospitalarias, la disminución del uso de opioides y la menor incidencia de complicaciones ha llevado a que numerosos centros reporten beneficios económicos asociados a la implementación de crioanalgesia dentro de programas ERAS. Algunos análisis sugieren que, aun considerando el costo del equipo, el ahorro en días de hospitalización y la menor necesidad de rescates analgésicos compensan ampliamente el gasto inicial, apoyando su adopción como técnica de primera línea. (26)

#### **2.5.6. Limitaciones y posibles complicaciones de la crioanalgesia**

Como se ha mencionado anteriormente, la crioanalgesia intercostal ofrece múltiples ventajas, sin embargo, es de relevancia estricta conocer las limitaciones que deben considerarse al seleccionar la estrategia analgésica. Una de las principales es el requerimiento de equipo especializado, como lo es la criosonda, el generador y sistemas de control, cuyo costo inicial puede limitar su implementación en centros con escasos recursos. Además, su correcta ejecución técnica exige entrenamiento específico, dado que una colocación inadecuada de la sonda puede reducir la eficacia o aumentar el riesgo de lesiones inadvertidas. (31)

Otra limitación relevante es que, a diferencia de técnicas modulables como la analgesia epidural torácica continua, el efecto de la crianalgesia no puede ajustarse una vez realizada, ya que depende del proceso biológico de degeneración y regeneración axonal. Esto implica que, si la analgesia inicial resulta insuficiente, deben utilizarse métodos complementarios como bloqueos intercostales o analgesia sistémica. Asimismo, existe la posibilidad poco frecuente de que la hipoestesia se prolongue más allá del tiempo esperado, especialmente en pacientes con respuesta sensorial variable o cuando se tratan múltiples niveles. (27,113)

En cuanto a complicaciones, si bien la crianalgesia es generalmente segura, pueden presentarse fenómenos neuropáticos transitorios, como parestesias, disestesias o dolor lancinante, que suelen resolverse de manera espontánea o con tratamiento sintomático. Asimismo, se han reportado casos de hipoestesia persistente en áreas pequeñas, en especial cuando la crisonda se aplica demasiado proximal al ganglio espinal o con excesiva potencia en un mismo sitio. Estas alteraciones sensoriales suelen ser de baja intensidad y raramente progresan a neuropatía crónica. (26,49)

Otras complicaciones poco frecuentes incluyen el sangrado o la lesión de los vasos intercostales durante la manipulación, el desarrollo accidental de un neumotórax o la aparición de dolor crónico persistente, aunque este último se observa en una proporción mínima de pacientes. De forma excepcional, se ha planteado la preocupación teórica de una mayor vulnerabilidad a infecciones en aquellos casos con descensos térmicos prolongados durante la cirugía; no obstante, la evidencia reciente no ha demostrado un incremento significativo en infecciones del sitio quirúrgico ni en complicaciones sépticas. Los estudios disponibles únicamente describen disminuciones leves de la temperatura sin repercusiones clínicas. (34,126)

En la vía percutánea, utilizada principalmente para el tratamiento de neuralgia intercostal o dolor neuropático crónico, pueden presentarse riesgos inherentes a los procedimientos intervencionistas, entre ellos, infección local, formación de hematomas o lesión de estructuras adyacentes. Aunque estas complicaciones son infrecuentes, deben considerarse cuidadosamente al seleccionar esta técnica fuera del contexto quirúrgico del MIRPE. (122)

Finalmente, aunque la evidencia disponible respalda de forma consistente los beneficios de la crianalgesia, incluida la reducción del dolor postoperatorio, del consumo de opioides y de la estancia hospitalaria, persisten limitaciones relacionadas con el seguimiento a largo plazo y la escasez de ensayos multicéntricos con alta rigurosidad metodológica. Esto subraya la necesidad de desarrollar investigaciones adicionales que permitan optimizar parámetros técnicos, como la duración de la congelación, el número de niveles tratados y el momento ideal de aplicación, así como definir con mayor exactitud su papel dentro de los protocolos multimodales de analgesia en cirugía torácica. (57)

## **2.6. Comparación de la crianalgesia con otras técnicas analgésicas en la cirugía de pectus excavatum**

### **2.6.1. Crianalgesia versus técnicas regionales**

La analgesia epidural torácica se ha considerado durante décadas el *standart of care* para el control del dolor en cirugía torácica, incluido el procedimiento de MIRPE, debido a su capacidad para bloquear fibras somáticas y simpáticas de forma segmentaria (29); no obstante, la TEA implica riesgos, como hipotensión, retención urinaria, bloqueo motor, hematoma epidural e infección, además de requerir un alto grado de experiencia técnica (127). Igualmente, en pacientes con *pectus excavatum*, pueden existir variaciones anatómicas torácicas que dificultan la colocación del catéter, sumado a la frecuente necesidad de profilaxis anticoagulante, lo que incrementa la preocupación por eventos neuraxiales.

En contraste, la crianalgesia intercostal evita la instrumentación cercana a la médula espinal y proporciona una analgesia prolongada, que se extiende durante varias semanas, cubriendo el periodo de dolor más intenso postoperatorio (128). Estudios comparativos han demostrado que la crianalgesia ofrece un control del dolor equivalente al de la TEA en los primeros días postoperatorios, con la ventaja de reducir significativamente los requerimientos de opioides y la incidencia de complicaciones asociadas al catéter epidural (116). En un ensayo clínico aleatorizado, se evidenció que los pacientes sometidos a crianalgesia presentaron menor incidencia de hipotensión y retención urinaria, así como movilización más temprana, sin diferencias significativas en la puntuación de dolor en reposo y en movimiento respecto a la TEA. (127)

El bloqueo paravertebral torácico (BPV) constituye otra alternativa regional que proporciona analgesia unilateral en los dermatomas correspondientes al sitio quirúrgico. Si bien posee un perfil de complicaciones menor que la TEA, su duración depende exclusivamente de las propiedades farmacocinéticas del anestésico local empleado, lo que suele requerir la colocación de catéteres para infusión continua en casos que requieran analgesia más allá de 24 horas (129). En este sentido, la crioanalgesia ofrece un bloqueo prolongado sin necesidad de dispositivos externos, evitando riesgos como desplazamiento del catéter, infección o incomodidad para el paciente (31). Asimismo, presenta menor variabilidad técnica dependiente del operador, ya que su eficacia no está influenciada por la difusión del anestésico local ni por la precisión de una inyección única.

Por su parte, el bloqueo del plano del erector de la espina (ESP) es técnicamente más sencillo y seguro, al realizarse lejos de la médula espinal y la pleura. Sin embargo, su duración también es limitada y depende exclusivamente del anestésico local. Aunque ha demostrado reducir el dolor y el consumo de opioides en el postoperatorio, la crioanalgesia ofrece una cobertura significativamente más prolongada del periodo doloroso y disminuye la necesidad de intervenciones adicionales. (35)

En síntesis, la crioanalgesia presenta una eficacia comparable a las técnicas regionales en términos de control del dolor agudo, pero con ventajas adicionales como mayor duración de su efecto, menor dependencia de dispositivos invasivos, menor variabilidad técnica y una reducción consistente de complicaciones asociadas a la instrumentación de la columna o la colocación de catéteres. (101)

### **2.6.2. Crioanalgesia versus analgesia intravenosa**

La analgesia intravenosa basada en opioides, administrada mediante PCA, bolos programados o infusión continua, ha sido tradicionalmente una de las estrategias más empleadas para el manejo del dolor postoperatorio en el MIRPE. Sin embargo, este enfoque presenta limitaciones importantes, como el control insuficiente de analgesia en ciertos pacientes, la variabilidad en la respuesta individual y la alta incidencia de efectos adversos como náuseas, vómitos, prurito, íleo paralítico, depresión respiratoria y sedación excesiva. (29)

La evidencia muestra que la crioanalgesia intercostal reduce de manera significativa el consumo total de opioides en el postoperatorio, disminuyendo así la frecuencia e intensidad de sus efectos adversos (112). En un estudio prospectivo, los pacientes que recibieron crioanalgesia de nervios intercostales utilizaron menos de la mitad de la dosis acumulada de morfina en comparación con aquellos que recibieron analgesia intravenosa exclusiva, igualmente, lograr una movilización más temprana y una mejor función respiratoria medida por espirometría incentivada (11). Este control analgésico más estable también se ha asociado con mayor adherencia y eficacia en las maniobras de fisioterapia respiratoria, fundamentales en el MIRPE para prevenir atelectasias y alteraciones ventilatorias postoperatorias.

Otra ventaja de la crioanalgesia sobre la analgesia intravenosa es la estabilidad del control del dolor a lo largo del tiempo. Mientras que los medicamentos intravenosos requieren dosis frecuentes o infusión continua para mantener niveles plasmáticos terapéuticos, lo que puede llevar a fluctuaciones en la puntuación de dolor; la crioanalgesia proporciona un bloqueo sostenido durante varias semanas, cubriendo de manera uniforme el periodo de mayor dolor postoperatorio. (128)

Finalmente, aunque la analgesia intravenosa multimodal puede mejorar el control del dolor y reducir parcialmente el consumo de opioides, sigue sin alcanzar la duración ni la estabilidad analgésica que ofrece la crioanalgesia. Además, carece del impacto demostrado por la crioanalgesia en la reducción de la estancia hospitalaria y la recuperación funcional temprana. (31)

En síntesis, la crioanalgesia supera a la analgesia intravenosa en la eficacia sostenida y en el perfil de seguridad, al reducir de forma significativa la exposición a opioides y sus efectos adversos, facilitar la movilización precoz y optimizar la recuperación postoperatoria. No obstante, ambas estrategias presentan beneficios y limitaciones propias y, lejos de concebirse como técnicas excluyentes, forman parte de un enfoque analgésico multimodal que constituye el estándar actual en el manejo del dolor postoperatorio del MIRPE. La combinación de una técnica regional de larga duración, como la crioanalgesia, con el apoyo de analgesia sistémica según necesidad, permite cubrir tanto el periodo de dolor intenso inmediato como las fluctuaciones dolorosas posteriores, favoreciendo un control analgésico más estable y una recuperación más segura y eficiente.

## CAPÍTULO III. PROTOCOLO ANALGÉSICO MULTIMODAL CON LA IMPLEMENTACIÓN DE LA CRIOANALGESIA EN CIRUGÍA DE NUSS

### 3.1. Consideraciones preoperatorias

Todo paciente candidato a corrección quirúrgica de *pectus excavatum* mediante técnica de Nuss con crianalgesia requiere una preparación integral, estructurada e interdisciplinaria. La valoración preoperatoria integral debe abarcar aspectos clínicos, anestésicos y quirúrgicos. Además, se debe realizar una historia clínica detallada, evaluación de comorbilidades y antecedentes anestésicos, así como un examen físico completo enfocado en la función respiratoria y cardiovascular. También es importante identificar condiciones como infecciones respiratorias recientes, asma mal controlada u otras, que puedan elevar el riesgo de complicaciones pulmonares postoperatorias; esto dado que la cirugía implicará ventilación unipulmonar y manipulación torácica invasiva. (121)

En caso de infección de vías respiratorias altas activa o recientes, se recomienda posponer la intervención, ya que dicha condición incrementa significativamente la incidencia de atelectasias, infecciones pulmonares y requerimiento de oxígeno suplementario en el postoperatorio. Asimismo, deben optimizarse las condiciones clínicas del paciente, como la función pulmonar, estado nutricional, entre otras antes de la cirugía. (130)

Desde el punto de vista anestésico, resulta fundamental verificar la disponibilidad y el adecuado funcionamiento de todo el equipo requerido para la crianalgesia. Esto incluye la criosonda y su fuente de gas, ya sea CO<sub>2</sub> o N<sub>2</sub>O líquido para la generación de frío, el sistema de refrigeración y control térmico, así como los dispositivos de visualización según la modalidad planificada: un ecógrafo con características apropiadas para la técnica percutánea o, en el caso de la aplicación intraoperatoria directa, el equipo de toracoscopia correspondiente (óptica, torre y monitor). (121)

Asimismo, deben garantizarse los dispositivos necesarios para el aislamiento pulmonar, como el tubo de doble lumen, bloqueadores bronquiales y videobroncoscopio, indispensables para la ventilación unipulmonar segura. Es esencial que tanto el equipo quirúrgico como el de anestesia estén familiarizados y entrenados en el uso de estos recursos,

ya que una aplicación incorrecta de la criosonda o fallos en el aislamiento pulmonar pueden comprometer tanto la eficacia analgésica como la seguridad del paciente. (121)

Es indispensable explicar de manera clara que se empleará una técnica regional avanzada de control del dolor, basada en la aplicación controlada de frío sobre los nervios intercostales (crioanalgesia), cuyo objetivo es generar un bloqueo sensitivo prolongado y eficaz. Esta información debe comunicarse destacando que la crioanalgesia ha demostrado disminuir de forma significativa los requerimientos de opioides sistémicos y, por ende, la incidencia de sus efectos adversos, contribuyendo a una recuperación más confortable y funcional para el paciente. Además de explicar que los pacientes que reciben crioanalgesia suelen tener estancias hospitalarias más cortas. (131)

De igual forma, es necesario describir de manera comprensible los efectos sensoriales esperables derivados del mecanismo de acción de la crioanalgesia. Entre ellos, se encuentran la hipoestesia o disminución de la sensibilidad en la pared torácica a lo largo de los dermatomas tratados, sensación de entumecimiento o adormecimiento local y la posible aparición de disestesias transitorias durante la regeneración nerviosa, habitualmente entre los 2 y 3 meses posteriores a la cirugía. Estos fenómenos suelen ser autolimitados y forman parte del proceso fisiológico de recuperación del nervio. Así mismo, debe enfatizarse que la crioanalgesia no produce un daño nervioso permanente; la interrupción de la conducción es reversible y la mayoría de los pacientes recuperan su sensibilidad habitual en un periodo aproximado de 3 a 6 meses. (26)

Sumado a lo anterior, se debe explicar ampliamente que solo una minoría muy reducida podría presentar dolor neuropático persistente o alteraciones sensoriales prolongadas, aunque la evidencia disponible muestra que estos casos son infrecuentes y suelen responder a tratamiento multimodal temprano (132). Por este motivo, es fundamental que tanto el paciente como su familia comprendan adecuadamente estos riesgos poco comunes y reciban orientación respecto al curso natural esperado de la recuperación sensitiva.

Es obligatorio obtener un consentimiento informado específico para la crioanalgesia, independiente del consentimiento quirúrgico habitual. Este documento debe detallar el

propósito de la técnica, sus beneficios esperados, incluyendo analgesia prolongada, reducción en el consumo de opioides y recuperación funcional optimizada, así como los riesgos potenciales y efectos sensoriales transitorios anteriormente descritos. La información debe adaptarse al nivel de comprensión del paciente y sus cuidadores, fomentando activamente que planteen preguntas y expresen inquietudes. Una formación preoperatoria adecuada favorece la adherencia al protocolo, reduce la ansiedad perioperatoria y mejora la experiencia global del paciente y su familia. (51,133)

Finalmente, en caso de que se seleccione la modalidad de crioanalgesia percutánea preoperatoria (descrita en la sección 3.2), se deberá coordinar el ingreso del paciente al hospital 48 horas antes de la cirugía. Este procedimiento requiere planificación logística con disponibilidad de sala de operaciones, personal entrenado y equipamiento necesario. Tras la crioablación inicial, el equipo médico evaluará si el paciente debe permanecer ingresado o si puede retornar temporalmente a su domicilio con las precauciones correspondientes, en preparación para la intervención definitiva programada. (122,131)

### **3.1.1. Profilaxis neuroprotectora**

Como parte de la preparación preoperatoria, se recomienda la implementación de profilaxis farmacológica dirigida a la neuromodulación preventiva del dolor. El objetivo de esta estrategia es reducir la incidencia de dolor neuropático postoperatorio y optimizar el confort global del paciente. Diversos estudios han demostrado que el inicio temprano de gabapentinoides en el periodo previo a la cirugía modula la hiperexcitabilidad neuronal, atenúa la sensibilización central y disminuye tanto la intensidad del dolor agudo como la probabilidad de transición hacia dolor crónico. (134)

Se recomienda iniciar un gabapentinoide aproximadamente siete días antes del procedimiento, ajustando la dosis de acuerdo con la tolerancia individual del paciente y vigilando la aparición de efectos adversos como somnolencia o mareos. Este enfoque preventivo constituye un componente esencial de las estrategias multimodales contemporáneas para analgesia perioperatoria en cirugía torácica (135). Se iniciará con:

- **Fase prequirúrgica (1 semana antes del procedimiento):**
  - Gabapentina: 100 mg cada 8 horas por 3 días, aumentando a 200 mg cada 8 horas si no hay efectos adversos.
  - Pregabalina (alternativa): 50 mg cada 8 horas por 3 días, aumentando a 75 mg si se tolera bien.

### **3.1.2. Crioanalgesia percutánea previo al MIRPE**

La crioanalgesia percutánea constituye la alternativa A del protocolo analgésico. Es una técnica regional de bloqueo sensitivo intercostal de larga duración que se realiza 48 horas antes de la cirugía, con el fin de iniciar precozmente la degeneración walleriana del nervio y asegurar una analgesia profunda desde el postoperatorio inmediato. (118)

#### **3.1.2.1. Criterios de selección del paciente**

La crioanalgesia percutánea está indicada en pacientes programados para MIRPE que cumplan con:

- Condición clínica estable que permita una breve anestesia general 48 horas antes del procedimiento.
- Ausencia de infección activa en piel o tejidos blandos del hemitórax lateral.
- Consentimiento informado específico firmado por el paciente y su familia, tras explicar los beneficios, riesgos y el carácter complementario de la técnica.
- Valoración favorable por un equipo anestésico entrenado en técnicas percutáneas.

Esta modalidad se prefiere cuando puede realizarse de forma programada, ya que anticipa el inicio del bloqueo nervioso y favorece una analgesia más homogénea en el postoperatorio temprano (111). La aplicación de la alternativa A del protocolo solo será posible cuando se cuente con todos los recursos necesarios, incluyendo criosonda percutánea funcional, fuente de gas apropiada, ecografía de alta resolución, insumos estériles y personal capacitado. La ausencia de cualquiera de estos elementos constituye un criterio para optar por la técnica intraoperatoria como vía alternativa.

### 3.1.2.2. Preparación del paciente

- Confirmación del plan con el paciente y su familia, reforzando el consentimiento informado específico.
- Optimización preoperatoria habitual (función respiratoria, comorbilidades, medicación crónica).
- Revisión de estudios de imagen.
- Explicar que no sustituye la cirugía: es un procedimiento analgésico complementario.
- Ayuno según protocolo del Hospital Calderón Guardia.

### 3.1.2.3. Procedimiento en sala de operaciones 48 horas antes

El paciente ingresa de forma electiva a sala de operaciones 48 horas antes del procedimiento de MIRPE, donde se implementa monitorización estándar: ECG, SpO<sub>2</sub>, presión arterial no invasiva, capnografía y temperatura. Antes de iniciar, se verifica la disponibilidad del equipo necesario:

- Ecógrafo con transductor lineal de alta frecuencia (10–15 MHz).
- Criosonda percutánea y su fuente de gas (N<sub>2</sub>O o CO<sub>2</sub>).
- Material estéril para la técnica (campos, gel estéril, agujas y apósitos).

Se realiza un *check list* quirúrgico adaptado, confirmando identidad del paciente, niveles intercostales a tratar y ausencia de contraindicaciones. Una vez completadas estas verificaciones, se procede a brindar a la anestesia general o sedación profunda, según la experiencia del equipo tratante. Sin embargo, se debe garantizar inmovilidad y tolerancia al frío profundo. Habitualmente, se utiliza:

- Inducción con propofol y un opioide de acción rápida.
- Relajación muscular según criterio del anesthesiólogo.
- Manejo de la vía aérea con mascarilla laríngea o tubo endotraqueal, sin necesidad de doble lumen.

Tras la inducción, el procedimiento tiene una duración aproximada de 20 a 40 minutos, dependiendo del número de niveles intercostales que deban tratarse.

### 3.1.2.4. Técnica percutánea guiada por ultrasonido

Con el paciente en decúbito supino y una ligera rotación contralateral, se expone adecuadamente la pared torácica lateral. Tras realizar asepsia amplia, se utiliza un transductor lineal de alta frecuencia para identificar la línea axilar media o posterior, donde el nervio intercostal es accesible de forma segura y reproducible.

Mediante ultrasonido se reconocen las estructuras clave del espacio intercostal, incluyendo la costilla superior e inferior, los planos musculares intercostales y el surco subcostal, en el cual discurren la arteria, vena y nervio intercostal. Una vez identificado el plano óptimo, se introduce la criosonda en plano, guiada en tiempo real, hasta contactar el borde inferior de la costilla correspondiente.

Antes de iniciar la aplicación del frío, es fundamental confirmar que la punta de la criosonda permanezca apoyada sobre el borde inferior de la costilla, sin invadir el surco subcostal, evitando así el contacto directo con los vasos intercostales y garantizando una adecuada transmisión del frío hacia el nervio.

Los niveles tratados suelen abarcar T3 a T8, seleccionando de 4 a 6 nervios por lado, según las características anatómicas y quirúrgicas del paciente:

- Altura y número de barras a colocar.
- Grado y patrón de deformidad torácica.
- Accesibilidad ecográfica de cada nivel.
- Dermatomas sometidos a mayor estiramiento o manipulación quirúrgica.

Cada nivel intercostal se trata con:

- Un ciclo de congelación de 2 minutos, alcanzando temperaturas aproximadas de  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Posterior descongelación pasiva hasta que la sonda pueda movilizarse sin resistencia.
- Evitar infiltración con anestésicos locales en la zona intervenida para no interferir con el efecto del frío.
- El procedimiento se repite de forma secuencial y bilateral.

### **3.1.2.5. Proceso de recuperación**

Tras finalizar la crioanalgesia, el paciente permanece en recuperación durante 60–90 minutos con vigilancia continua. Durante este periodo, se monitorizan parámetros hemodinámicos y se evalúan molestias leves como dolor superficial en el sitio de punción, náuseas o mareos.

Aunque es un evento poco frecuente, se deben observar signos clínicos que sugieran neumotórax, especialmente disnea o asimetría en la expansión torácica. Antes del egreso, se recomienda realizar un examen POCUS pulmonar para confirmar la ausencia de neumotórax, aportando una verificación adicional de seguridad.

Si el paciente permanece estable y sin complicaciones, puede darse de alta el mismo día. Se refuerzan las indicaciones de alarma: disnea, dolor torácico progresivo y fiebre, y se establece el plan analgésico domiciliario, que incluye continuar la gabapentina según pauta previamente iniciada y el uso de analgésicos leves como paracetamol según necesidad.

### **3.1.2.6. Precauciones y contraindicaciones**

#### **Contraindicaciones absolutas:**

- Infección cutánea local.
- Coagulopatía no corregida.
- Intolerancia severa al frío (criocrioglobulinemia, síndrome de Raynaud grave).
- Que el paciente o su familia no acepte el procedimiento.

#### **Contraindicaciones relativas:**

- Deformidad anatómica marcada que dificulte el abordaje.
- Imposibilidad para recibir anestesia general corta.
- Infecciones respiratorias recientes.

#### **Precauciones:**

- Utilizar ultrasonido de alta resolución para evitar penetración pleural.
- Mantener normotermia perioperatoria.
- Estricta asepsia durante múltiples punciones.

### 3.2. Consideraciones transoperatorias durante el MIRPE

El manejo transoperatorio en pacientes sometidos al procedimiento de Nuss debe adaptarse a la alternativa analgésica seleccionada durante la planificación preoperatoria. Este protocolo contempla dos modalidades posibles de crioanalgesia, mutuamente excluyentes el día de la cirugía:

1. **Alternativa A:** el paciente recibió crioanalgesia percutánea 48 horas antes del procedimiento (ver sección 3.1.1).
  - En este caso, el bloqueo intercostal ya está en instauración al momento de la cirugía, por lo que la analgesia regional intraoperatoria tendrá únicamente un rol complementario, según evolución clínica.
2. **Alternativa B:** el paciente no recibió crioanalgesia previa, por lo que se realizará crioanalgesia toracoscópica intraoperatoria durante la misma cirugía.
  - Esta alternativa requiere medidas adicionales para garantizar analgesia adecuada en el postoperatorio temprano mientras se instaure el efecto completo de la crioanalgesia.

A continuación, se describen los cuidados transoperatorios comunes a ambos escenarios, seguidos de las consideraciones específicas para cada modalidad.

#### 3.2.1. Consideraciones transoperatorias con crioanalgesia percutánea previa

En los pacientes que ya recibieron la crioanalgesia percutánea 48 horas antes del MIRPE, el bloqueo nervioso se encuentra en fase activa al momento de la cirugía, lo que simplifica la anestesia intraoperatoria y reduce la necesidad de intervenciones adicionales. Las siguientes son características generales del abordaje percutáneo:

- No requiere aislamiento pulmonar. Se utiliza tubo endotraqueal estándar y ventilación convencional.
- La monitorización térmica es la habitual, sin necesidad de medidas adicionales más allá del manejo estándar de normotermia.
- No incrementa el tiempo quirúrgico, pues la analgesia ya está establecida antes del inicio de la intervención.

### **Papel de la analgesia intraoperatoria complementaria:**

- El anestesiólogo puede decidir aplicar un bloqueo regional adicional según la evolución clínica o características del paciente (PVB, ESP, infiltraciones locales).
- La estabilidad hemodinámica suele ser favorable debido a la menor respuesta nociceptiva.

### **Ventajas transoperatorias del abordaje percutáneo:**

- Menor complejidad ventilatoria.
- Disminución de requerimientos de oxígeno suplementario.
- Flujo quirúrgico más rápido.
- Evita la manipulación pleural y el colapso pulmonar.

### **3.2.2. Consideraciones transoperatorias con crioanalgesia toracoscópica intraoperatoria**

Cuando la crioanalgesia percutánea no pudo realizarse en el periodo preoperatorio, la crioanalgesia toracoscópica se lleva a cabo durante el MIRPE bajo visión directa. Este enfoque implica mayores exigencias ventilatorias y ajustes anestésicos específicos, además de la necesidad obligatoria de complementar la analgesia regional, dado que el efecto de la crioanalgesia no es inmediato.

#### **Requerimientos ventilatorios y de exposición**

La técnica toracoscópica exige condiciones particulares para asegurar una correcta visualización de los nervios intercostales:

- Aislamiento pulmonar obligatorio, mediante:
  - Tubo de doble lumen, o
  - Bloqueador bronquial guiado con videobroncoscopio.
- Ventilación unipulmonar, con vigilancia continua de la oxigenación y mecánica ventilatoria.
- Exposición pleural amplia para identificar secuencialmente los niveles intercostales y aplicar la criosonda de manera precisa.

**Monitorización transoperatoria:**

Debido a las características del abordaje:

- Se requiere control térmico estricto, por la combinación de exposición pleural y aplicación localizada de frío.
- La monitorización hemodinámica y ventilatoria debe mantenerse estrecha durante los periodos de colapso pulmonar y durante la reinflación.

**Implicaciones quirúrgicas:**

La integración de la crianalgesia bajo visión directa incrementa la complejidad del procedimiento:

- Aumenta el tiempo quirúrgico, al incluir la inserción del toracoscopio, exploración pleural e identificación sistemática de los niveles intercostales.
- Demanda una coordinación precisa entre cirugía y anestesia para optimizar la exposición y garantizar la seguridad del paciente.

**Analgesia complementaria obligatoria:**

Dado que la crianalgesia intraoperatoria no proporciona analgesia inmediata, es imprescindible establecer una técnica regional continua que cubra el periodo inicial postoperatorio. El objetivo es asegurar un control adecuado del dolor mientras la crioterapia alcanza su efecto completo.

**Analgesia epidural torácica (técnica de primera elección):**

Cuando no se ha colocado en el periodo preoperatorio, el catéter epidural puede insertarse durante la misma cirugía, ya sea mediante técnica de Tuohy por palpación convencional, idealmente a nivel T4–T5 y antes de la reinflación pulmonar. Una vez colocado, se recomienda administrar una dosis de carga con bupivacaína 0.25% (5 mL) más morfina epidural calculada por peso del paciente (0.03–0.1 mg/kg), con el fin de establecer un bloqueo sensitivo bilateral adecuado. Esta estrategia garantiza una analgesia efectiva tanto durante el despertar como en el postoperatorio temprano.

### **Catéteres paravertebrales bilaterales:**

Una alternativa sólida cuando la analgesia epidural está contraindicada o no puede realizarse es la colocación de catéteres paravertebrales bilaterales. En este caso, se introducen catéteres finos en los espacios paravertebrales T4–T5, localizados mediante ecografía, lo que permite asegurar una adecuada posición del catéter en cada hemitórax. Esta técnica ofrece la posibilidad de proporcionar analgesia continua unilateral o bilateral, según las necesidades clínicas del paciente.

### **3.2.3. Preparación anestésica integral y monitorización transoperatoria**

La preparación inicial antes de la inducción anestésica constituye un paso crítico para garantizar un desarrollo seguro y eficiente del MIRPE, particularmente cuando se incorpora un plan analgésico avanzado como la crioanalgesia. En esta etapa, se debe realizar una verificación estructurada con todo el equipo quirúrgico y anestésico, confirmando la identidad del paciente, el sitio quirúrgico y la estrategia analgésica planificada. Asimismo, se deben asegurar accesos venosos permeables y adecuados para el procedimiento: idealmente dos vías venosas periféricas de buen calibre, o bien un acceso venoso central cuando se anticipa el uso de fármacos vasoactivos o múltiples infusiones simultáneas.

El monitoreo debe instaurarse conforme a los estándares internacionales, iniciando y ampliándose según la complejidad del caso:

#### **Monitoreo básico inicial:**

- ECG continuo.
- Oximetría de pulso.
- Presión arterial no invasiva cada 3–5 minutos.
- Capnografía obligatoria.

#### **Monitoreo avanzado según criterio clínico:**

- **Línea arterial** si se anticipa inestabilidad hemodinámica, necesidad de análisis gasométricos frecuentes o manejo vasoactivo.

- **Monitoreo avanzado en pacientes con comorbilidades relevantes** que puedan incrementar la complejidad anestésica (p. ej., cardiopatías, enfermedad pulmonar, hipertensión pulmonar, alteraciones neuromusculares, riesgo elevado de sangrado).

En cuanto a la profilaxis antibiótica, esta debe administrarse siguiendo los protocolos institucionales para cirugía torácica. De manera ideal, se recomienda cefazolina 30 mg/kg IV (1–2 g habituales) dentro de los 60 minutos previos a la incisión o clindamicina 10 mg/kg (máx. 600–900 mg) en pacientes alérgicos a betalactámicos.

Sin embargo, en la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS), el antibiótico de primera línea disponible es cefalotina, por lo que se indica 50 mg/kg IV como dosis inicial, con redosificación cada 2 horas durante el intraoperatorio, debido a su vida media corta y con el fin de asegurar niveles séricos óptimos durante todo el procedimiento. Como alternativa de segunda línea, para pacientes con alergia o contraindicación para betalactámicos, la CCSS cuenta con clindamicina, la cual puede emplearse siguiendo la dosificación ponderal correspondiente.

Esta profilaxis es especialmente relevante en el MIRPE asociado a crioanalgesia, ya que, aunque se trata de técnicas mínimamente invasivas, implican manipulación adicional de tejidos y acceso a planos profundos. Por ello, se debe mantener una asepsia estricta al manipular la criosonda, los puertos toracoscópicos o las incisiones percutáneas, con el objetivo de reducir el riesgo de infección del sitio quirúrgico.

Un aspecto que requiere vigilancia rigurosa es la termorregulación del paciente, cuando se realiza la crioanalgesia toracoscópica intraoperatoria. Tanto el ambiente frío del quirófano como el empleo de criosondas que alcanzan temperaturas cercanas a  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  pueden favorecer la aparición de hipotermia perioperatoria, la cual se asocia con mayor riesgo de infección, coagulopatía y alteraciones hemodinámicas. Por ello, se recomienda:

- Uso de calentador por convección con manta térmica durante todo el procedimiento.
- Administración de fluidos IV precalentados.

- Ambiente quirúrgico termorregulado, evitando descensos significativos de temperatura.
- Monitorización continua de temperatura central, procurando mantenerla  $\geq 36$  °C.

Finalmente, se debe garantizar una posición quirúrgica segura y ergonómica. Habitualmente, el paciente se coloca en decúbito supino con los brazos extendidos, empleando protectores acolchados en todos los puntos de apoyo para prevenir lesiones por presión o tracción nerviosa. Esta posición debe proporcionar un campo torácico amplio y estable para la toracoscopía, asegurando simultáneamente que no se comprometa la integridad neuromuscular ni la comodidad del paciente bajo anestesia.

#### **3.2.4. Consideraciones farmacológicas intraoperatorias**

Las guías actuales enfatizan la importancia de un enfoque analgésico multimodal durante la cirugía, incluso cuando se cuenta con una técnica regional de larga duración como la crioanalgesia. La combinación de diferentes clases farmacológicas permite aprovechar mecanismos de acción complementarios, reducir la dosis total de opioides y optimizar el control del dolor en el periodo perioperatorio. A continuación, se detalla la estrategia anestésica propuesta durante el transoperatorio.

##### **Inducción anestésica**

Se realiza una inducción intravenosa estándar, priorizando analgesia adecuada y condiciones óptimas para la intubación orotraqueal y la posterior realización de la crioanalgesia:

- **Midazolam IV:** dosis 0.03–0.05 mg/kg, opcional según nivel de ansiedad,
- **Fentanilo IV:** dosis 1–2  $\mu$ g/kg, administrado en bolo lento inmediatamente antes o durante la inducción, atenúa la respuesta hemodinámica a la laringoscopia e iniciar analgesia.
- **Propofol IV:** dosis 2–3 mg/kg titulado según respuesta clínica, para inducción hipnótica.
- **Relajante neuromuscular:**
  - Rocuronio dosis inicial: 0.6–1 mg/kg. Dosis de mantenimiento: 0.1–0.2 mg/kg según necesidad clínica y monitoreo del bloqueo neuromuscular.

- Atracurio dosis inicial: 0.5 mg/kg. Dosis de mantenimiento: 0.1–0.2 mg/kg cada 20–30 minutos.
- Facilitan la intubación y garantizan inmovilización adecuada.
- **Dexametasona IV:** dosis 4–8 mg tras la inducción, con doble beneficio: profilaxis antiemética y coadyuvancia analgésica por su efecto antiinflamatorio.

### **Mantenimiento anestésico**

El mantenimiento puede llevarse a cabo mediante anestesia general balanceada o con técnica intravenosa total, dependiendo de los recursos institucionales y la preferencia del anesthesiólogo:

- **Sevoflurano** en mezcla aire–O<sub>2</sub>, ajustado a un plano de 0.8–1.2 CAM titulado según signos clínicos y monitorización cerebral (BIS) para garantizar una profundidad anestésica adecuada.
- **Propofol en TCI**, con un objetivo estimado de 3–4 µg/mL, ajustado según respuesta hemodinámica, signos clínicos y monitorización cerebral.

Ambas modalidades proporcionan un plano anestésico adecuado para el MIRPE, siempre que se mantenga vigilancia estrecha de la profundidad anestésica y estabilidad hemodinámica.

### **Analgesia multimodal intraoperatoria**

La analgesia IV se administra como parte de un esquema multimodal que complementa la crianalgesia y reduce los requerimientos de opioides. Se seleccionan fármacos basados en eficacia, seguridad y disponibilidad institucional (CCSS).

### **Analgésicos no opioides**

- **Paracetamol IV:** dosis 15 mg/kg (máx. 1 g) en infusión lenta. Brinda analgesia basal central y mejora la eficacia del esquema multimodal.
- **Metamizol IV:** dosis 30 mg/kg (máx. 2 g) diluidos en 100 mL, pasar en ~15 min. Eficaz como analgésico y antipirético. En la CCSS se utiliza de rutina y puede combinarse con diclofenaco si no hay contraindicación.

- **Diclofenaco IV:** dosis 1–2 mg/kg (máx. 75 mg) en bolo lento. AINE disponible en la CCSS; potencia la analgesia multimodal. Contraindicaciones: insuficiencia renal aguda, úlcera péptica activa, sangrado activo, plaquetopenia significativa.

### **Opioides y coadyuvantes intraoperatorios**

- **Morfina IV: dosis 0.1 mg/kg**, proporciona analgesia residual para el postoperatorio inmediato. Se recomienda administrarla antes de iniciar la crioanalgesia para asegurar efecto al finalizar la cirugía.
- **Fentanilo IV: dosis 1–5 µg/kg** en bolos. Útil en picos de estímulo nociceptivo: creación del espacio retroesternal, paso y rotación de la barra, fijación. La crioanalgesia percutánea reduce de forma importante los requerimientos totales.

### **Infusiones analgésicas y moduladores del dolor**

Los diversos coadyuvantes intravenosos cuentan con evidencia sólida que respalda su utilidad para modular la sensibilización central, mejorar el control del dolor agudo y reducir la incidencia de dolor crónico postoperatorio en cirugía torácica. Sin embargo, la selección y combinación de estas infusiones queda a criterio del anestesiólogo tratante, quien debe individualizar el manejo según las características del paciente, la presencia o ausencia de crioanalgesia ya instaurada, el grado de deformidad de la pared torácica y la dificultad técnica prevista para el procedimiento. De este modo, el esquema final debe equilibrar eficacia analgésica, estabilidad hemodinámica y seguridad, adaptándose a las necesidades clínicas de cada caso.

- **Ketamina IV:** antagonista NMDA que disminuye sensibilización central y reduce consumo de opioides.
  - **Bolo inicial:** 0.25 mg/kg.
  - **Infusión:** 0.1–0.3 mg/kg/h.
- **Lidocaína IV:** analgesia sistémica y antiinflamatoria; reduce requerimiento opioide y favorece recuperación intestinal.
  - **Infusión:** 1–2mg/kg/h.

- **Sulfato de magnesio IV:** coadyuvante analgésico y modulador NMDA; puede disminuir la respuesta simpática al estímulo quirúrgico. Precaución con hipotensión o bradicardia y bloqueo neuromuscular prolongado.
  - **Bolo inicial:** 30–50 mg/kg.
  - **Infusión:** 10 mg/kg/h.
- **Dexmedetomidina IV:** sedación cooperativa, estabilidad simpática y reducción de los requerimientos anestésicos. Precaución con bradicardia e hipotensión.
  - **Bolo inicial:** 0.5–1 µg/kg en 10 minutos.
  - **Infusión:** 0.2–0.5 µg/kg/h.

### **Profilaxis antiemética**

Si bien el ondansetrón es uno de los antieméticos más utilizados en el contexto quirúrgico a nivel mundial, el fármaco disponible en la CCSS es el granisetron, un antagonista altamente selectivo del receptor 5-HT<sub>3</sub>, cuya acción bloquea la transmisión aferente vagal desde el tracto gastrointestinal hacia el centro del vómito. Este mecanismo lo convierte en una opción eficaz y segura para prevenir las náuseas y vómitos postoperatorios.

La administración de dexametasona al inicio de la cirugía añade un efecto antiemético sinérgico. En situaciones de alto riesgo emetogénico, puede considerarse la adición de droperidol, siempre bajo criterio clínico y siguiendo los protocolos institucionales.

- **Granisetron IV:** 0.04 mg/kg ( $\approx$ 1 mg en adultos), administrar ~30 min antes del cierre.
- **Dexametasona IV:** 4–8 mg al inicio como parte de la inducción.
- **Ondansetrón IV:** 0.1 mg/kg (alternativa si está disponible en otros centros).
- **Droperidol IV:** 0.625–1.25 mg en pacientes con alto riesgo emetogénico.

### **Bomba elastomérica intravenosa**

Como parte de la estrategia multimodal, se recomienda el uso de una bomba elastomérica IV durante las primeras 48 horas, período habitual de mayor intensidad dolorosa tras el MIRPE. Una formulación frecuente es:

- Metamizol: 4–6 g/día en infusión continua.

- Morfina: 10–15 mg/día en infusión continua.
- Granisetron: 3mg/día en infusión continua.

Esta modalidad proporciona una analgesia basal estable y disminuye la necesidad de rescates opioides durante las primeras horas del postoperatorio. Para garantizar la seguridad del paciente y la correcta continuidad del manejo en la URPA, toda bomba elastomérica debe ser rotulada antes del traslado, consignando el nombre del paciente, la fecha y hora de conexión, el contenido de la mezcla con sus fármacos y concentraciones, la velocidad de infusión y la identificación del anestesiólogo responsable. Esta rotulación clara y completa asegura trazabilidad, facilita la verificación del tratamiento y reduce errores en la administración analgésica.

### **Bomba elastomérica regional (si se colocó catéter regional)**

En pacientes con catéter epidural o paravertebral, la bomba puede conectarse al sistema regional para proporcionar analgesia continua con:

- Bupivacaína 0.1–0.125% a 5 mL/h por 48 h, o una concentración/velocidad ajustada por el anestesiólogo tratante según la anatomía torácica, la severidad de la deformidad, la técnica quirúrgica utilizada, la presencia de crioanalgesia previa y la condición clínica del paciente.

Este enfoque es particularmente útil cuando se anticipa un mayor estímulo nociceptivo o cuando la crioanalgesia podría tardar en alcanzar su efecto máximo. Igualmente, la bomba regional debe rotularse con la misma información obligatoria para asegurar continuidad en el manejo.

### **Traslado a URPA**

Una vez establecida la estrategia analgésica y completado el procedimiento, se debe realizar una verificación sistemática que garantice la estabilidad del paciente y un traspaso seguro hacia la recuperación. Este chequeo final debe incluir:

- Confirmar ventilación bilateral, combinando auscultación torácica y POCUS pulmonar para verificar deslizamiento pleural, expansión simétrica y descartar un

neumotórax inadvertido, una de las complicaciones inmediatas más frecuentes tras el MIRPE.

- Revisar signos vitales, estabilidad hemodinámica y nivel de analgesia, realizando ajustes farmacológicos según sea necesario.
- Verificar la integridad, permeabilidad y fijación de cualquier catéter regional (epidural o paravertebral), asegurando ausencia de filtraciones y bajo riesgo de desplazamiento.
- Comprobar que la bomba elastomérica, IV o regional, esté funcionando de manera correcta y debidamente rotulada, con información completa para permitir continuidad segura del manejo.
- Documentar en la hoja anestésica la técnica analgésica utilizada, incluyendo modalidad de crianalgesia, presencia de catéter regional y uso de bomba elastomérica, para asegurar una transición clara y ordenada del plan analgésico.

Tras completar estas medidas, el paciente se encuentra en condiciones óptimas para una transferencia segura a URPA, donde se continuará con el monitoreo y el manejo del dolor postoperatorio inmediato.

### **3.3. Consideraciones postoperatorias**

El manejo postoperatorio inmediato es fundamental para consolidar los beneficios de la crianalgesia, mantener un control óptimo del dolor y detectar precozmente cualquier complicación. Aunque la crianalgesia proporciona un bloqueo sensitivo prolongado que cubre las semanas de mayor dolor, se debe mantener un enfoque multimodal complementario y una vigilancia estrecha durante las primeras horas. A continuación, se resumen las pautas esenciales de cuidados postoperatorios.

#### **Monitoreo y vigilancia inmediata**

Al salir de quirófano, el paciente debe permanecer en la Unidad de Recuperación Postanestésica (URPA) con monitoreo cardiorrespiratorio continuo hasta lograr una recuperación anestésica adecuada. Los principales aspectos por evaluar son:

- **Estado respiratorio:** vigilar saturación de oxígeno, frecuencia respiratoria y excursión torácica simétrica, descartando neumotórax residual o atelectasias

importantes. En MIRPE es recomendable realizar una radiografía de tórax portátil en URPA para confirmar adecuada expansión pulmonar y posición de la barra. Administrar oxígeno suplementario según necesidad para mantener  $SpO_2 > 92\%$ .

- **Control del dolor:** evaluar el nivel analgésico con escalas validadas (EVA en pacientes cooperadores y CPOT en pacientes somnolientos). El objetivo es mantener  $EVA \leq 3/10$ . Un bloqueo efectivo por crioanalgesia suele producir puntajes muy bajos en reposo; si persiste  $EVA > 4$ , considerar refuerzo analgésico sistémico o ajuste de infusiones.
- **Función neurológica y bloqueo regional:** en presencia de un catéter epidural o paravertebral, valorar dermatomas implicados, función motora, especialmente en caso de epidural y signos de bloqueo simpático excesivo como hipotensión o bradicardia. Revisar el sitio del catéter para descartar sangrado o filtraciones.
- **Otros parámetros relevantes:** registrar diuresis horaria para vigilar retención urinaria asociada a opioides o hipovolemia, revisar heridas quirúrgicas para descartar sangrado en banda y palpar la pared torácica para identificar enfisema subcutáneo progresivo, lo cual puede sugerir fuga aérea o neumotórax. Ante cualquier hallazgo sospechoso, actuar de forma inmediata.

Estas medidas se alinean con los protocolos de seguridad descritos en la literatura para el MIRPE con crioanalgesia, cuyo principio fundamental es anticipar y manejar precozmente cualquier complicación incipiente.

### **Régimen analgésico postoperatorio**

Aunque la crioanalgesia ofrece un bloqueo sensitivo prolongado, es fundamental mantener un esquema analgésico multimodal durante toda la hospitalización para evitar brechas analgésicas, prevenir dolor de rebote y facilitar la movilización temprana. El plan postoperatorio incluirá:

- **Infusión analgésica continua con bomba elastomérica (IV):** se mantiene por 48 horas, con una mezcla de morfina y metamizol en infusión continua, ajustada según la respuesta analgésica del paciente. Esta modalidad provee analgesia constante y disminuye la necesidad de rescates frecuentes.

- **Analgésia regional continua:** si se le colocó al paciente un catéter regional catéter epidural o paravertebral, continuar la infusión de bupivacaína mediante bomba elastomérica durante 48 horas. Si el paciente presenta dolor, pueden administrarse bolos de morfina epidural según criterio clínico. El retiro del catéter se valora una vez que el dolor esté controlado con analgesia sistémica.
- **Paracetamol:** administrar 1 g IV cada 6–8 horas durante las primeras 24–48 horas; luego cambiar a 500–1000 mg VO cada 6–8 horas según tolerancia. Debe mantenerse como eje del esquema multimodal mientras persista dolor.
- **AINE:** se cuenta con ibuprofeno 400 mg VO cada 8 h, si no hay contraindicaciones. En caso de dolor inflamatorio moderado, se puede aplicar diclofenaco IM 75 mg como dosis de rescate. Se debe vigilar función renal y riesgo gastrointestinal.
- **Gabapentinoides:** continuar el esquema iniciado de gabapentina 300 mg c/8h o pregabalina 75 mg c/8h, durante aproximadamente una semana. Ajustar en caso de somnolencia excesiva. Su objetivo es prevenir o reducir dolor neuropático intercostal durante la regeneración nerviosa.
- **Opioides de rescate:** en caso de dolor persistente, administrar morfina IV en bolos de 2 mg cada 5–10 minutos hasta obtener alivio (máx. 0.1 mg/kg). Una vez retirada la vía IV, el rescate se puede realizar con acetaminofén con codeína 100-50-mg VO cada 12 h, siempre buscando la mínima dosis eficaz.

### **Movilización y rehabilitación precoz**

La rehabilitación precoz es un pilar del manejo postoperatorio y forma parte de los lineamientos ERAS para cirugía torácica. Una vez que el paciente esté despierto, sin náuseas significativas y con el dolor adecuadamente controlado, habitualmente dentro de las primeras 12–24 horas, se deben iniciar las siguientes medidas:

- **Ejercicios respiratorios profundos:** uso de espirómetro incentivo cada 1–2 horas mientras esté despierto, fomentando inspiraciones lentas y profundas para prevenir atelectasias. Se instruye al paciente en *splinting* torácico, sostener una almohada al toser, para facilitar una tos eficaz con menor molestia.

- **Fisioterapia respiratoria:** el personal especializado guiará ejercicios de respiración diafragmática, inspiración sostenida, movilización de secreciones y corrección postural. Estas intervenciones mejoran la expansión pulmonar y reducen complicaciones respiratorias.
- **Deambulación precoz:** sentar al paciente, ayudarlo a ponerse de pie y comenzar a caminar con asistencia tan pronto como sea seguro, idealmente dentro de las primeras 12–24 horas. Inicialmente se realizarán caminatas cortas 2–3 veces al día, aumentando progresivamente la movilidad. La analgesia proporcionada por la crianalgesia facilita este proceso, permitiendo una participación más activa desde el primer día.

Este enfoque integral de movilización temprana, sumado al buen control analgésico, contribuye a una reducción notable de complicaciones postoperatorias, como neumonía, íleo, trombosis venosa profunda, entre otras, y favorece una recuperación funcional acelerada, con estancias hospitalarias más cortas y desenlaces globalmente mejores.

### **Evaluación neurológica post-crioanalgesia**

La crioanalgesia intercostal produce una hipoestesia intencional en los dermatomas tratados, por lo que es necesario realizar una valoración neurológica diaria durante la hospitalización. Esta evaluación permite distinguir los cambios esperados de posibles efectos adversos y brinda tranquilidad al paciente respecto a la evolución normal del procedimiento.

- **Hipoestesia esperada:** documentar las áreas de disminución sensitiva en la pared torácica, que suelen corresponder a bandas desde la línea axilar hasta la línea media anterior en niveles aproximados T3–T8. Esta hipoestesia es fisiológica, puede persistir varias semanas o meses y debe explicarse al paciente como parte del efecto terapéutico de la crioanalgesia.
- **Disestesias o dolor neuropático:** indagar sobre sensaciones anormales como ardor, hipersensibilidad o descargas eléctricas, que pueden presentarse durante la regeneración nerviosa en un 5–15% de los pacientes. Si resultan molestas, se pueden aumentar la dosis de los gabapentinoides o considerar neuromoduladores adicionales como duloxetina. En casos focales, pueden emplearse medidas tópicas

como capsaicina o parches de lidocaína. El objetivo es que estas molestias no interfieran con la rehabilitación ni el descanso.

- **Evaluación motora:** confirmar la ausencia de déficit motor, ya que la crioanalgesia afecta únicamente fibras sensitivas intercostales. Si se detecta debilidad o compromiso diafragmático, debe buscarse otra causa, como efecto residual de anestesia regional o una complicación diferente.

En general, la hipoestesia postoperatoria es bien tolerada, no afecta la función muscular ni respiratoria y se resuelve de manera progresiva, con recuperación completa en la mayoría de los pacientes hacia los 3–6 meses. Es esencial comunicar al paciente que un grado de entumecimiento prolongado es normal y forma parte del efecto esperado que contribuye al control del dolor.

### **Alta hospitalaria y seguimiento postoperatorio**

Con el manejo multimodal adecuado, la mayoría de los pacientes pueden egresar entre las 48–72 horas posteriores al MIRPE. La utilización de crioanalgesia ha permitido adelantar de forma significativa la fecha de alta en comparación con protocolos tradicionales basados en analgesia epidural. Antes del egreso, el paciente debe cumplir los siguientes criterios:

- Tolera alimentación y analgesia oral.
- Deambula de manera independiente o con mínima asistencia.
- Presenta dolor controlado con el esquema domiciliario ( $EVA \leq 3$  en reposo).
- No presenta complicaciones activas (fiebre, disnea, íleo).
- Cuenta con una radiografía portátil o imagen de control según protocolo quirúrgico, confirmando adecuada posición de la barra y ausencia de neumotórax clínicamente significativo.

### **Analgesia domiciliaria sugerida**

El plan analgésico tras el egreso se mantiene simple y seguro, aprovechando el efecto prolongado de la crioanalgesia:

- Paracetamol 500 mg–1 g VO c/6–8 h por 10 días.
- Ibuprofeno 400 mg VO c/8 h por 4 días.

- Gabapentina 300 mg VO c/8 h por una semana posterior al egreso, siempre que haya sido bien tolerada.
- Acetaminofén con codeína (30 mg de codeína) solo como rescate puntual en domicilio si el dolor supera lo esperado.

Se debe instruir al paciente sobre dosis máximas, interacciones y evitar duplicación de AINE.

### **Signos de alarma tras el alta**

El paciente debe consultar inmediatamente si presenta:

- Fiebre persistente  $> 38.5$  °C o escalofríos.
- Dificultad respiratoria, dolor torácico agudo o empeoramiento súbito de la disnea.
- Dolor torácico intenso o abultamiento del tórax (posible desplazamiento de barra).
- Signos de infección en las incisiones quirúrgicas.
- Síntomas neurológicos inusuales: parestesias intensas, dolor neurálgico severo o debilidad.

### **Seguimiento postoperatorio orientado a la crioanalgesia**

La valoración por anestesia se enfoca exclusivamente en el efecto de la crioanalgesia, sin intervención sobre aspectos quirúrgicos. Se recomiendan controles en:

- **Semana 4**, para documentar el estado sensitivo torácico, hipoestesia residual y presencia de disestesias.
- **Semana 12**, para confirmar la progresión normal de la regeneración nerviosa.

Estos controles permiten documentar la duración del bloqueo, la calidad del dolor, la presencia de hipoestesia residual y la tasa de efectos secundarios neurosensitivos, datos esenciales para obtener retroalimentación continua sobre la estrategia utilizada.

Este protocolo presenta una propuesta integral para el manejo perioperatorio del MIRPE, alineada con los principios ERAS y fundamentada en la evidencia disponible sobre la crioanalgesia como estrategia analgésica de larga duración. Al integrar medidas farmacológicas, técnicas regionales y rehabilitación temprana, se establece un marco

ordenado y coherente para optimizar la atención perioperatoria y favorecer una recuperación más confortable para los pacientes. Su aplicación sistemática permitirá estandarizar el abordaje institucional y generar futuras oportunidades de evaluación clínica que contribuyan a mejorar y ajustar estas recomendaciones según la experiencia local y la evidencia emergente.

## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN

El procedimiento de Nuss representa uno de los mayores retos analgésicos en cirugía torácica debido a la combinación de dolor nociceptivo, inflamatorio y neuropático derivado de la manipulación de los nervios intercostales, la creación del túnel retroesternal y la presión sostenida de las barras correctoras. Estos factores favorecen fenómenos de sensibilización periférica y central que incrementan la intensidad del dolor agudo y el riesgo de evolucionar hacia dolor crónico postoperatorio, lo que enfatiza la necesidad de estrategias analgésicas eficaces y de larga duración. (43)

Durante años, el control del dolor tras el MIRPE se ha basado, principalmente, en opioides intravenosos y en técnicas regionales como la analgesia epidural torácica o el bloqueo paravertebral. Si bien estas modalidades han demostrado eficacia, presentan limitaciones relevantes: riesgo de bloqueo simpático excesivo, hipotensión, retención urinaria, necesidad de monitorización estrecha, fallos técnicos y variabilidad en la distribución segmentaria del anestésico local. Estas consideraciones han impulsado la búsqueda de alternativas que combinen seguridad, duración prolongada y menor dependencia de opioides. (55)

En este contexto, la crioanalgesia intercostal ha emergido como una herramienta analgésica capaz de superar varias de estas barreras. Mediante la inducción de una neuroapraxia transitoria por enfriamiento controlado del nervio intercostal, se obtiene un bloqueo sensitivo prolongado que coincide con el periodo de mayor dolor tras la corrección del *pectus excavatum*. La evidencia disponible muestra reducciones significativas en el consumo de opioides, mejor tolerancia a la fisioterapia respiratoria y recuperación funcional más rápida en comparación con esquemas analgésicos convencionales. (26)

Ensayos clínicos y series observacionales en pacientes sometidos a MIRPE han demostrado que la crioanalgesia se asocia con menores puntuaciones de dolor, disminución de los requerimientos de analgésicos sistémicos y reducción de la estancia hospitalaria. En particular, estudios comparativos frente a analgesia epidural han documentado una disminución del uso de opioides y una tendencia hacia altas hospitalarias más tempranas, sin

incremento de complicaciones mayores, lo que se alinea estrechamente con los objetivos de los programas de recuperación mejorada. (113)

No obstante, la crioanalgesia no está exenta de limitaciones. El efecto analgésico no puede modularse una vez aplicado, ya que depende del ritmo de regeneración axonal y, en algunos pacientes, se han descrito hipoestesia prolongada, hipersensibilidad o disestesias transitorias en el territorio intercostal tratado. Aun así, la mayoría de los estudios reportan una incidencia baja de dolor neuropático persistente y una resolución espontánea de estos síntomas en el seguimiento, lo que respalda un perfil de seguridad aceptable en la población pediátrica y adolescente. (12)

La implementación de la técnica también puede verse condicionada por la disponibilidad de equipo específico y por la necesidad de entrenamiento en su ejecución. En la actualidad, se describen dos abordajes complementarios: la crioanalgesia toracoscópica intraoperatoria, que permite una visualización directa de los nervios intercostales durante el MIRPE y la crioanalgesia percutánea guiada por ultrasonido, que ofrece una alternativa mínimamente invasiva y programable en el periodo perioperatorio, ampliando las posibilidades de adaptación a distintos entornos y recursos institucionales. (111)

En este marco, el protocolo propuesto en este trabajo final de graduación integra la crioanalgesia intercostal como eje central dentro de un enfoque multimodal alineado con los principios ERAS. El esquema contempla una fase preoperatoria centrada en la educación del paciente y su familia, así como en la neuromodulación preventiva; una fase intraoperatoria que enfatiza la correcta ejecución del abordaje de crioanalgesia seleccionado y un manejo anestésico protector; y una fase postoperatoria basada en analgésicos no opioides y rehabilitación temprana, con el objetivo de reducir la exposición a opioides, facilitar la deambulación precoz y acortar la estancia hospitalaria. (51)

Este diseño ofrece una guía clara, reproducible y adaptable a los recursos del centro, con el potencial de estandarizar la atención analgésica en pacientes sometidos al MIRPE. No obstante, aunque algunos estudios han comenzado a explorar desenlaces a mediano y largo plazo, incluyendo síntomas sensitivos residuales y neuropáticos, la evidencia disponible sigue siendo insuficiente y heterogénea para determinar con certeza si la crioanalgesia

reduce, aumenta o no modifica el riesgo de dolor crónico postoperatorio tras la reparación del *pectus excavatum*. Por ello, la implementación sistemática de este protocolo en un entorno institucional, junto con el registro estructurado de desenlaces, puede contribuir a generar series locales y, eventualmente, estudios prospectivos y multicéntricos que aporten mayor claridad sobre el impacto real de la crioanalgesia en la prevención del dolor crónico postoperatorio. (11,53)

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

1. El dolor postoperatorio mal controlado en el procedimiento de Nuss tiene un impacto multidimensional: compromete la función respiratoria, retrasa la rehabilitación, aumenta el riesgo de desarrollar dolor crónico y afecta negativamente el bienestar psicológico. Estas consecuencias justifican la necesidad de implementar protocolos de analgesia multimodal y estrategias preventivas eficaces, como la crioanalgesia intercostal intraoperatoria, que han demostrado reducir la intensidad del dolor agudo, mejorar la recuperación funcional y disminuir la incidencia de complicaciones postoperatorias.
2. El manejo óptimo del dolor en pacientes sometidos a corrección quirúrgica de *pectus excavatum* mediante técnica MIRPE requiere un enfoque integral que combine farmacoterapia sistémica con técnicas regionales efectivas. La selección de la estrategia analgésica debe individualizarse, considerando factores como las características del paciente, la experiencia del equipo y la disponibilidad de recursos. En este contexto, las tendencias actuales favorecen la reducción del uso exclusivo de opioides y promueven el empleo de técnicas menos invasivas, pero con eficacia comprobada, como el bloqueo paravertebral, el bloqueo del plano erector de la espina y la crioanalgesia intercostal.
3. La evidencia científica respalda de manera sólida la crioanalgesia como una técnica eficaz y segura en el contexto del MIRPE. Su implementación ha mostrado reducciones significativas en el consumo de opioides, estancias hospitalarias más cortas, mayor movilidad temprana y una recuperación global más eficiente. Estos beneficios han favorecido su incorporación dentro de esquemas analgésicos multimodales y protocolos ERAS, posicionándola como una de las intervenciones más prometedoras en cirugía torácica mínimamente invasiva.
4. Aunque los resultados a corto plazo son ampliamente favorables, la evidencia disponible aún es insuficiente para determinar con certeza el impacto de la crioanalgesia sobre el desarrollo de dolor crónico postoperatorio. La heterogeneidad de los estudios, los tamaños muestrales reducidos y los seguimientos limitados dificultan establecer conclusiones definitivas. Por ello, se requiere generar datos locales y fomentar

investigaciones prospectivas y multicéntricas que permitan evaluar este desenlace con mayor precisión.

5. El protocolo propuesto en este trabajo representa una contribución valiosa al manejo integral del dolor postoperatorio en el MIRPE. Su estructura por fases perioperatorias, fundamentada en la evidencia disponible y adaptable a las condiciones del entorno clínico nacional, ofrece una guía clara para mejorar el control del dolor, optimizar la recuperación postoperatoria y estandarizar la atención. Su implementación podría, además, estimular el desarrollo de nuevas líneas de investigación y fortalecer la adopción de prácticas basadas en evidencia en la población pediátrica y adolescente sometida a este procedimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Moore KL, Dalley AF, Agur AMR. Anatomía con orientación clínica. 8th ed. Wolters Kluwer; 2018.
2. Netter FH, Hansen JT. Atlas de anatomía humana. 7th ed. Barcelona: Elsevier; 2018.
3. OpenStax College. Anatomy & Physiology. Second edition. Houston, Texas: University of Michigan Medical School; 2022.
4. Standring Susan, Gray Henry, Anand Neel, Tunstall Richard. Gray's anatomy: the anatomical basis of clinical practice. Elsevier; 2021. 1588 p.
5. Levitzky MG. Mechanics of Breathing. In: Pulmonary Physiology, 10e [Internet]. New York, NY: McGraw Hill; 2022. Available from: [accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?aid=1192525768](https://accessmedicine.mhmedical.com/content.aspx?aid=1192525768)
6. Hansen JT., Lambert DR., Götzens García V. Netter. Anatomía Clínica. Elsevier Masson; 2006.
7. Zacha S, Andrzejewska A, Jastrzębska-Ligocka B, Szwed A, Modrzejewska E, Zacha W, et al. Intercostal nerve cryoanalgesia in the treatment of pain in patients operated on by the modified Nuss method with the BackOnFeet application—a new strategy to improve outcomes. *Front Pediatr.* 2023 Jan 18;10.
8. Koshi Rachel, Cunningham DJ. Cunningham's manual of practical anatomy. Volume 2, Thorax and abdomen. 16th ed. Oxford University Press; 2017. 339 p.
9. Kim S, Idowu O, Palmer B, Lee SH. Use of transthoracic cryoanalgesia during the Nuss procedure. *Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery.* 2016 Mar 1;151(3):887–8.
10. Morton D.A., Foreman K, Albertine K.H. Anatomía macroscópica. Un panorama general. Second Edition. McGraw Hill; 2022.
11. Fraser JA, Briggs KB, Svetanoff WJ, Aguayo P, Juang D, Fraser JD, et al. Short and long term outcomes of using cryoablation for postoperative pain control in patients after pectus excavatum repair. *J Pediatr Surg.* 2022 Jun 1;57(6):1050–5.
12. 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 Mar 1;36(3):317–24.
13. Guyton AC, Hall JE. Tratado de fisiología médica. 14th ed. Elsevier; 2020.
14. Barrett K.E., Barman S.M., Brooks H.L., Yuan J.J. Ganong Fisiología médica. 26th ed. McGraw-Hill Education; 2020.
15. Loscalzo J, Fauci A, Kasper D, Hauser S, Longo D, Jameson J. Harrison's Principles of Internal Medicine. 21 edition. McGraw-Hill Education; 2022.

16. International Association for the Study of Pain. International Association for the Study of Pain. 2020. IASP terminology.
17. Scalise PN, Demehri FR. The management of pectus excavatum in pediatric patients: a narrative review. Vol. 12, Translational Pediatrics. AME Publishing Company; 2023. p. 208–20.
18. Schug SA, Lavand'homme P, Barke A, Korwisi B, Rief W, Treede RD. The IASP classification of chronic pain for ICD-11: chronic postsurgical or posttraumatic pain. *Pain*. 2019 Jan;160(1):45–52.
19. Kehlet H, Jensen TS, Woolf CJ. Persistent postsurgical pain: risk factors and prevention. *The Lancet*. 2006 May;367(9522):1618–25.
20. Raja SN, Carr DB, Cohen M, Finnerup NB, Flor H, Gibson S, et al. The revised International Association for the Study of Pain definition of pain: concepts, challenges, and compromises. *Pain*. 2020 Sep;161(9):1976–82.
21. Scholz J, Woolf CJ. Can we conquer pain? *Nat Neurosci*. 2002 Nov 28;5(S11):1062–7.
22. Latremoliere A, Woolf CJ. Central Sensitization: A Generator of Pain Hypersensitivity by Central Neural Plasticity. *J Pain*. 2009 Sep;10(9):895–926.
23. Wildgaard K, Ringsted TK, Hansen HJ, Petersen RH, Kehlet H. Persistent postsurgical pain after video-assisted thoracic surgery – an observational study. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2016 May 21;60(5):650–8.
24. Gerner P. Postthoracotomy Pain Management Problems. *Anesthesiol Clin*. 2008 Jun;26(2):355–67.
25. Woolf CJ, Salter MW. Neuronal Plasticity: Increasing the Gain in Pain. *Science* (1979). 2000 Jun 9;288(5472):1765–8.
26. Eldredge RS, McMahon L. Intercostal nerve cryoablation therapy for the repair of pectus excavatum: a systematic review. Vol. 10, *Frontiers in Surgery*. Frontiers Media SA; 2023.
27. Graves C, Idowu O, Lee S, Padilla B, Kim S. Intraoperative cryoanalgesia for managing pain after the Nuss procedure. *J Pediatr Surg*. 2017 Jun 1;52(6):920–4.
28. Nuss D. Minimally invasive surgical repair of pectus excavatum. *Semin Pediatr Surg* [Internet]. 2008 Aug 1 [cited 2025 Jul 28];17(3):209–17. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1055858608000206>
29. Beltran R, Veneziano G, Bhalla T, Kenney B, Tumin D, Bissonnette B, et al. Postoperative pain management in patients undergoing thoracoscopic repair of pectus excavatum: A retrospective analysis of opioid consumption and adverse effects in adolescents. *Saudi J Anaesth*. 2017 Oct 1;11(4):427–31.
30. Kelly RE. Pectus excavatum: historical background, clinical picture, preoperative evaluation and criteria for operation. *Semin Pediatr Surg*. 2008 Aug;17(3):181–93.

31. Toselli L, Gigena C, Bellia-Munzon G, Sanjurjo D, Vallee M, Martínez-Ferro M. Lessons Learned after 176 Patients Treated with a Standardized Procedure of Thoracoscopic Cryoanalgesia during Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum. *J Pediatr Surg*. 2024 Mar 1;59(3):372–8.
32. Haecker FM, Krebs TF, Kleitsch KU. Current Development of Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum (MIRPE). *Children*. 2022 Apr 1;9(4).
33. Santana L, Driggers J, Carvalho NF. Pain management for the Nuss procedure: comparison between erector spinae plane block, thoracic epidural, and control. *World Journal of Pediatric Surgery*. 2022 Aug;5(4):e000418.
34. Park HJ, Lee SY, Lee CS. Complications associated with the nuss procedure: analysis of risk factors and suggested measures for prevention of complications. *J Pediatr Surg*. 2004 Mar;39(3):391–5.
35. 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 Aug 1;55(8):1444–7.
36. Kelly RE. Pectus excavatum: historical background, clinical picture, preoperative evaluation and criteria for operation. *Semin Pediatr Surg*. 2008 Aug;17(3):181–93.
37. 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* [Internet]. 2018 Apr 1;53(4):728–32. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2017.07.020>
38. Makkad B, Heinke TL, Sheriffdeen R, Meng ML, Kachulis B, Grant MC, et al. Practice Advisory for Postoperative Pain Management of Thoracic Surgical Patients: A Report from the Society of Cardiovascular Anesthesiologists. *J Cardiothorac Vasc Anesth* [Internet]. 2025 May 1;39(5):1306–24. Available from: <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2024.12.004>
39. Saxena AK, Castellani C, Höllwarth ME. Surgical aspects of thoracoscopy and efficacy of right thoracoscopy in minimally invasive repair of pectus excavatum. *J Thorac Cardiovasc Surg*. 2007 May;133(5):1201–5.
40. Torre M, Guerriero V, Wong MCY, Palo F, Lena F, Mattioli G. Complications and trends in minimally invasive repair of pectus excavatum: A large volume, single institution experience. *J Pediatr Surg*. 2021 Oct;56(10):1846–51.
41. Wildgaard K, Petersen RH, Hansen HJ, Møller-Sørensen H, Ringsted TK, Kehlet H. Multimodal analgesic treatment in video-assisted thoracic surgery lobectomy using an intraoperative intercostal catheter†. *European Journal of Cardio-Thoracic Surgery*. 2012 May;41(5):1072–7.

42. Buchwald J, Ligarski D, Polewczyk T. Long-term results after the modified Ravitch procedure performed in children and adolescents - A one-time procedure without the need to use additional support of the sternum. A retrospective study. *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska*. 2021;17(4):173–7.
43. Kehlet H, Jensen TS, Woolf CJ. Persistent postsurgical pain: risk factors and prevention. *The Lancet*. 2006 May;367(9522):1618–25.
44. Bouhassira D, Attal N, Alchaar H, Boureau F, Brochet B, Bruxelle J, et al. Comparison of pain syndromes associated with nervous or somatic lesions and development of a new neuropathic pain diagnostic questionnaire (DN4). *Pain*. 2005 Mar;114(1):29–36.
45. Katz J, Seltzer Z. Transition from acute to chronic postsurgical pain: risk factors and protective factors. *Expert Rev Neurother*. 2009 May 9;9(5):723–44.
46. Buvanendran A, Kroin JS. Multimodal analgesia for controlling acute postoperative pain. *Curr Opin Anaesthesiol*. 2009 Oct;22(5):588–93.
47. Dworkin RH, O'Connor AB, Backonja M, Farrar JT, Finnerup NB, Jensen TS, et al. Pharmacologic management of neuropathic pain: Evidence-based recommendations. *Pain*. 2007 Dec;132(3):237–51.
48. DiFiore JW, Robertson JO, Sung W. Sensory Recovery Following Intercostal Nerve Cryoablation for the Nuss Procedure. *J Pediatr Surg*. 2024 Jan;161904.
49. Eldredge RS, Ochoa B, Khoury E, Mihalcin K, Ostlie D, Lee J, et al. Long-Term Sensory Function 3 years after Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum with Cryoablation. *J Pediatr Surg*. 2024 Mar 1;59(3):379–84.
50. Rettig RL, Rudikoff AG, Lo HYA, Lee CW, Vázquez WD, Rodríguez K, et al. Same day discharge for pectus excavatum—is it possible? *J Pediatr Surg*. 2022 Sep 1;57(9):34–8.
51. Zacha S, Biernawska J. Cryoanalgesia as the Essential Element of Enhanced Recovery after Surgery (ERAS) in Children Undergoing Thoracic Surgery—Scoping Review. Vol. 14, *Journal of Personalized Medicine*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI); 2024.
52. Chiu MZ, Li R, Koka A, Demehri FR. Pain management after pediatric minimally invasive repair of pectus excavatum: a narrative review. Vol. 13, *Translational Pediatrics*. AME Publishing Company; 2024. p. 2267–81.
53. Macintyre PE., Schug SA. *Acute pain management: a practical guide*. CRC Press; 2021.
54. Muhly WT, Beltran RJ, Bielsky A, Bryskin RB, Chinn C, Choudhry DK, et al. Perioperative Management and In-Hospital Outcomes After Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum: A Multicenter Registry Report From the Society for Pediatric Anesthesia Improvement Network. *Anesth Analg*. 2019 Feb 1;128(2):315–27.

55. Chou R, Gordon DB, De León-Casasola OA, Rosenberg JM, Bickler S, Brennan T, et al. Management of postoperative pain: A clinical practice guideline from the American pain society, the American society of regional anesthesia and pain medicine, and the American society of anesthesiologists' committee on regional anesthesia, executive committee, and administrative council. *Journal of Pain*. 2016 Feb 1;17(2):131–57.
56. 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 May;49(5):798–806.
57. Linton SC, Tian Y, Zeineddin S, Alayleh A, De Boer C, Goldstein SD, et al. Intercostal Nerve Cryoablation Reduces Opioid Use and Length of Stay Without Increasing Adverse Events. *Ann Surg*. 2024 Apr;279(4):699–704.
58. Grass JA. Patient-Controlled Analgesia.
59. Akinboro S, John R, Reyna T, Davis R, Ayoub C, Sangster R, et al. A pilot study of multimodal pain management for same-day discharge after minimally invasive repair of pectus excavatum (Nuss procedure) in children. *Pediatr Surg Int*. 2023 Dec 1;39(1).
60. Hwang W. Multimodal analgesia strategies for optimized pain management in thoracic surgery. *Journal of the Korean Medical Association*. 2025 Jan 10;68(1):29–36.
61. Vane JR, Botting RM. Mechanism of action of antiinflammatory drugs. *Int J Tissue React*. 1998;20(1):3–15.
62. Chiu MZ, Li R, Koka A, Demehri FR. Pain management after pediatric minimally invasive repair of pectus excavatum: a narrative review. *Transl Pediatr*. 2024 Dec;13(12):2267–81.
63. Ong CKS, Lirk P, Seymour RA, Jenkins BJ. The Efficacy of Preemptive Analgesia for Acute Postoperative Pain Management: A Meta-Analysis. *Anesth Analg*. 2005 Mar;100(3):757–73.
64. Gajraj NM, Joshi GP. Role of Cyclooxygenase-2 Inhibitors in Postoperative Pain Management. *Anesthesiol Clin North Am*. 2005 Mar;23(1):49–72.
65. Graham GG, Scott KF. Mechanism of Action of Paracetamol. *Am J Ther*. 2005 Jan;12(1):46–55.
66. Konijnenbelt-Peters J, van der Heijden C, Ekhart C, Bos J, Bruhn J, Kramers C. Metamizole (Dipyrone) as an Alternative Agent in Postoperative Analgesia in Patients with Contraindications for Nonsteroidal Anti-Inflammatory Drugs. *Pain Practice*. 2017 Mar 27;17(3):402–8.
67. González Vallejos AI, Ramírez Sandí H, Taborga J, Zavaleta Monestel E, Chaverri Fernández JM. Caracterización del uso de analgésicos y antiinflamatorios en el postoperatorio inmediato de pacientes adultos intervenidos quirúrgicamente en un Hospital privado de Costa Rica en el período Noviembre 2008 - Abril 2009. *Revista Médica de la Universidad de Costa Rica*. 2010 Jan 1;4(1).

68. Taylor CP. Mechanisms of action of gabapentin. *Rev Neurol (Paris)*. 1997;153 Suppl 1:S39-45.
69. Kehlet H, Jensen TS, Woolf CJ. Persistent postsurgical pain: risk factors and prevention. *The Lancet*. 2006 May;367(9522):1618–25.
70. Peng PW, Wijeyesundera DN, Li CC. Use of Gabapentin for Perioperative Pain Control – a Meta-Analysis. *Pain Res Manag*. 2007 Jan;12(2):85–92.
71. Radvansky BM, Shah K, Parikh A, Sifonios AN, Le V, Eloy JD. Role of Ketamine in Acute Postoperative Pain Management: A Narrative Review. *Biomed Res Int*. 2015;2015:1–10.
72. Schwenk ES, Viscusi ER, Buvanendran A, Hurley RW, Wasan AD, Narouze S, et al. Consensus Guidelines on the Use of Intravenous Ketamine Infusions for Acute Pain Management From the American Society of Regional Anesthesia and Pain Medicine, the American Academy of Pain Medicine, and the American Society of Anesthesiologists. *Reg Anesth Pain Med*. 2018 Jun;1.
73. Woolf CJ. Central sensitization: Implications for the diagnosis and treatment of pain. *Pain*. 2011 Mar;152(3):S2–15.
74. Silva A, Mourão J, Vale N. A Review of the Lidocaine in the Perioperative Period. *J Pers Med*. 2023 Dec 11;13(12):1699.
75. McCarthy GC, Megalla SA, Habib AS. Impact of Intravenous Lidocaine Infusion on Postoperative Analgesia and Recovery from Surgery. *Drugs*. 2010 Jun;70(9):1149–63.
76. Weibel S, Jelting Y, Pace NL, Helf A, Eberhart LH, Hahnenkamp K, et al. Continuous intravenous perioperative lidocaine infusion for postoperative pain and recovery in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2018 Jun 4;2018(6).
77. Lysakowski C, Dumont L, Czarnetzki C, Tramèr MR. Magnesium as an Adjuvant to Postoperative Analgesia: A Systematic Review of Randomized Trials. *Anesth Analg*. 2007 Jun;104(6):1532–9.
78. Fawcett WJ, Haxby EJ, Male DA. Magnesium: physiology and pharmacology. *Br J Anaesth*. 1999 Aug;83(2):302–20.
79. De Oliveira GS, Almeida MD, Benzon HT, McCarthy RJ. Perioperative Single Dose Systemic Dexamethasone for Postoperative Pain. *Anesthesiology*. 2011 Sep 1;115(3):575–88.
80. Waldron NH, Jones CA, Gan TJ, Allen TK, Habib AS. Impact of perioperative dexamethasone on postoperative analgesia and side-effects: systematic review and meta-analysis. *Br J Anaesth*. 2013 Feb;110(2):191–200.
81. Mahmoud M, Mason KP. Dexmedetomidine: review, update, and future considerations of paediatric perioperative and periprocedural applications and limitations. *Br J Anaesth*. 2015 Aug;115(2):171–82.

82. Kim M, Huh J, Choi H, Hwang W. Impact of Dexmedetomidine-Based Opioid-Sparing Anesthesia on Opioid Use After Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum: A Prospective Randomized Controlled Trial. *J Clin Med*. 2024 Nov 29;13(23):7264.
83. Imani F, Zaman B, De Negri P. Postoperative Pain Management: Role of Dexmedetomidine as an Adjuvant. *Anesth Pain Med*. 2021 Jan 2;10(6).
84. Hadzic Admir. Hadzic's textbook of regional anesthesia and acute pain management. McGraw-Hill Education; 2017. 1506 p.
85. Becker DE, Reed KL. Local Anesthetics: Review of Pharmacological Considerations. *Anesth Prog*. 2012;59(2):90–102.
86. El-Boghdadly K, Pawa A, Chin KJ. Local anesthetic systemic toxicity: current perspectives. *Local Reg Anesth*. 2018 Aug;Volume 11:35–44.
87. Casati A, Putzu M. Bupivacaine, levobupivacaine and ropivacaine: are they clinically different? *Best Pract Res Clin Anaesthesiol*. 2005 Jun;19(2):247–68.
88. Neal JM, Bernardis CM, Butterworth JF, Di Gregorio G, Drasner K, Hejtmanek MR, et al. ASRA Practice Advisory on Local Anesthetic Systemic Toxicity. *Reg Anesth Pain Med*. 2010 Mar;35(2):152–61.
89. Van Polen EJ, Franssen CJ, Daemen JHT, Isabella AJ, Franssen AJPM, Hulsewé KWE, et al. Postoperative Pain Management After Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum: A Systematic Review and Network Meta-analysis. *J Pediatr Surg*. 2025 Jun;60(6):162282.
90. Freise H, Van Aken HK. Risks and benefits of thoracic epidural anaesthesia. *Br J Anaesth* [Internet]. 2011 Dec 1 [cited 2025 Aug 4];107(6):859–68. Available from: <https://doi.org/10.1093/bja/aer339>
91. Rawal N. Epidural Technique for Postoperative Pain. *Reg Anesth Pain Med*. 2012;37(3):310–7.
92. Gropper MA. Miller's Anesthesia. Elsevier; 2020. 2824 p.
93. Bedfordth NM, Aitkenhead AR, Hardman JG. Haematoma and abscess after epidural analgesia. *Br J Anaesth*. 2008 Sep;101(3):291–3.
94. Karmakar MK. Thoracic Paravertebral Block. *Anesthesiology*. 2001 Sep 1;95(3):771–80.
95. Richardson J, Lönnqvist PA. Thoracic paravertebral block. *Br J Anaesth*. 1998 Aug;81(2):230–8.
96. Karmakar MK. Chapter 62 - Thoracic Paravertebral Block. In: Gray AT, editor. *Atlas of Ultrasound-Guided Regional Anesthesia (Fourth Edition)* [Internet]. Philadelphia: Elsevier; 2026. p. 302–29. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443246012000621>

97. Rabanal Llevot JM, Fayad Fayad M, Bartolomé Pacheco MJ, Carceller Malo JM, Naranjo Gómez S, Ortega Morales J. Continuous paravertebral block as an analgesic method in thoracotomy. *Cirugía Española (English Edition)* [Internet]. 2010;88(1):30–5. Available from: <https://www.elsevier.es/es-revista-cirugia-espanola-english-edition--436-articulo-continuous-paravertebral-block-as-an-S2173507710700065>
98. Kot P, Rodríguez P, Granell M, Cano B, Rovira L, Morales J, et al. The erector spinae plane block: a narrative review. *Korean J Anesthesiol*. 2019 Jun 1;72(3):209–20.
99. Braehler MR. Chapter 61 - Erector Spinae Plane Block. In: Gray AT, editor. *Atlas of Ultrasound-Guided Regional Anesthesia (Fourth Edition)* [Internet]. Philadelphia: Elsevier; 2026. p. 296–301. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978044324601200061X>
100. Guerra-Londono CE, Privorotskiy A, Cozowicz C, Hicklen RS, Memtsoudis SG, Mariano ER, et al. Assessment of Intercostal Nerve Block Analgesia for Thoracic Surgery. *JAMA Netw Open*. 2021 Nov 15;4(11):e2133394.
101. Sandeep B, Huang X, Li Y, Xiong D, Zhu B, Xiao Z. A comparison of regional anesthesia techniques in patients undergoing video-assisted thoracic surgery: A network meta-analysis. *International Journal of Surgery*. 2022 Sep;105:106840.
102. Desai N, Albrecht E, El-Boghdadly K. Perineural adjuncts for peripheral nerve block. *BJA Educ*. 2019 Sep;19(9):276–82.
103. Guerra-Londono CE, Privorotskiy A, Cozowicz C, Hicklen RS, Memtsoudis SG, Mariano ER, et al. Assessment of Intercostal Nerve Block Analgesia for Thoracic Surgery. *JAMA Netw Open*. 2021 Nov 15;4(11):e2133394.
104. Zapletal B, Bsuehner P, Begic M, Slama A, Vierthaler A, Schultz MJ, et al. Effectiveness and Safety of Erector Spinae Plane Block vs. Conventional Pain Treatment Strategies in Thoracic Surgery. *J Clin Med*. 2025 Apr 22;14(9):2870.
105. Davies RG, Myles PS, Graham JM. A comparison of the analgesic efficacy and side-effects of paravertebral vs epidural blockade for thoracotomy—a systematic review and meta-analysis of randomized trials. *Br J Anaesth*. 2006 Apr;96(4):418–26.
106. Archer V, Robinson T, Kattail D, Fitzgerald P, Walton JM. Postoperative pain control following minimally invasive correction of pectus excavatum in pediatric patients: A systematic review. *J Pediatr Surg*. 2020 May;55(5):805–10.
107. Bastianello M, Torre M, Bonfiglio R, Calevo MG, Palomba L, Uva P, et al. Cryoanalgesia for Pain Management After Pectus Excavatum Repair (COPPER) in Adolescents: A Randomized Controlled Trial. *Pediatric Anesthesia*. 2025 May 4;35(5):347–58.
108. Slavin BR, Markowitz MI, Klifto KM, Prologo FJ, Taghioff SM, Dellon AL. Cryoanalgesia: Review with Respect to Peripheral Nerve. *J Reconstr Microsurg*. 2023 May 24;40(4):302–10.

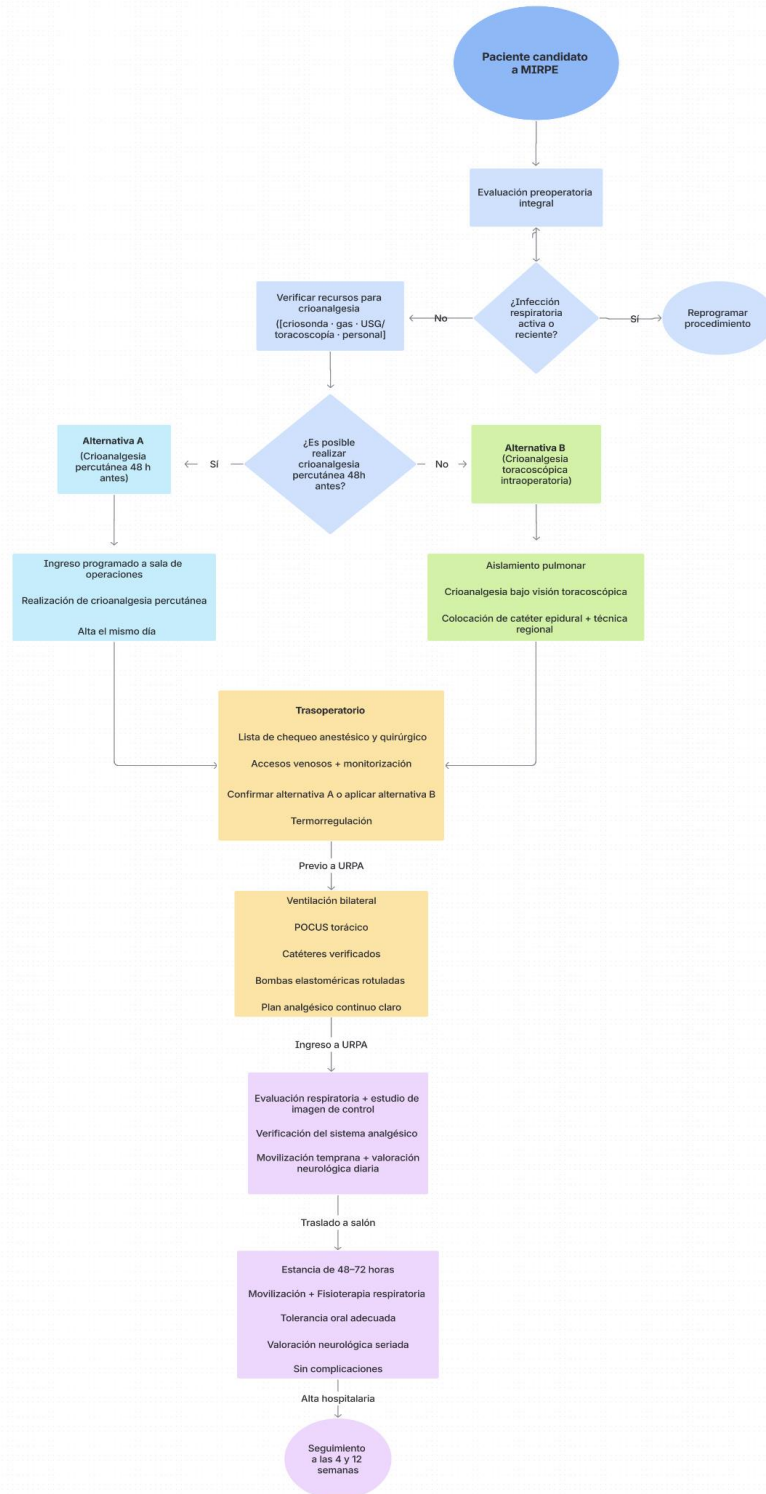
109. Biel E, Aroke EN, Maye J, Zhang SJ. The applications of cryoneurolysis for acute and chronic pain management. *Pain Practice*. 2023 Feb 4;23(2):204–15.
110. DiFiore JW, Robertson JO, Sung W. Sensory Recovery Following Intercostal Nerve Cryoablation for the Nuss Procedure. *J Pediatr Surg*. 2025 Jan;60(1):161904.
111. Velayos M, Alonso M, Estefanía K, Jesús Muñoz A, Torres R, Hernández F, et al. Ultrasound-Guided Percutaneous Cryoanalgesia for Pectus Excavatum: When Should It be Applied? *European Journal of Pediatric Surgery*. 2023 Feb 18;33(01):061–7.
112. Arshad SA, Hatton GE, Ferguson DM, Li LT, Austin MT, Tsao KJ. Cryoanalgesia enhances recovery from minimally invasive repair of pectus excavatum resulting in reduced length of stay: A case-matched analysis of NSQIP-Pediatric patients. *J Pediatr Surg*. 2021 Jul 1;56(7):1099–102.
113. 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 Nov 1;54(11):2250–6.
114. Erinjeri JP, Clark TWI. Cryoablation: Mechanism of Action and Devices. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. 2010 Aug;21(8):S187–91.
115. Ilfeld BM, Finneran JJ. Cryoneurolysis and Percutaneous Peripheral Nerve Stimulation to Treat Acute Pain. *Anesthesiology*. 2020 Nov 8;133(5):1127–49.
116. Van Braak H, De Beer S, De Jong JR, Stevens MF, Musters G, Zwaveling S, et al. Intercostal nerve cryoablation or epidural analgesia for multimodal pain management after the Nuss procedure: a cohort study. *European Journal of Pediatric Surgery*. 2023 Dec 1;
117. Nicolás M, Acosta CM, Martínez Ferro M, Alesandrini A, Sullon S, Speroni FA, et al. Short communication: ultrasound-guided percutaneous cryoanalgesia of intercostal nerves for uniportal video-assisted thoracic surgery. *Ultrasound J*. 2022 Dec 30;14(1):33.
118. Mariconti S, Bronco A, Pelliccioli I, Chiudinelli L, Cattaneo M, Cheli M, et al. Earlier preoperative percutaneous intercostal cryoanalgesia improves recovery after pectus excavatum surgery. *Reg Anesth Pain Med*. 2024 Nov 7;rapm-2024-105960.
119. Notrica DM, McMahon LE, Hahn A, Ndikintum N, Dua M, Jaroszewski DE. Intercostal Nerve Cryoablation During Pectus Excavatum Surgery for Postoperative Pain Management. *Ann Surg*. 2025 Jul 25;
120. Torre M, Mameli L, Bonfiglio R, Guerriero V, Derosas L, Palomba L, et al. A New Device for Thoracoscopic Cryoanalgesia in Pectus Excavatum Repair: Preliminary Single Center Experience. *Front Pediatr*. 2021 Jan 18;8.
121. Gallardo CC, Martínez J, Bellía-Munzon G, Nazar M, Sanjurjo D, Toselli L, Martínez-Ferro M. Crioanalgesia toracoscópica: nueva estrategia para el control del dolor postoperatorio en cirugía del pectus excavatum. *Cir Pediatr*. 2020;33(1):11-5.

122. Janssen N, Daemen JHT, Franssen AJPM, van Polen EJ, van Roozendaal LM, Hulsewé KWE, et al. Intercostal nerve cryoablation versus thoracic epidural analgesia for minimal invasive Nuss repair of pectus excavatum: a protocol for a randomised clinical trial (ICE trial). *BMJ Open*. 2024 Mar 25;14(3).
123. Cruz Álvarez JE, Daza Merizalde JA, Ugazzi Betancourt MJM, Sánchez Salazar GD. Intercostal Cryoanalgesia in Pediatric Nuss Repair for Pectus Excavatum: A Three-Case Series From Ecuador. *Cureus*. 2025 Nov 4;
124. Song SH, Moon DH, Shim YH, Jung H, Lee S. Limited cryoablation reduces hospital stay and opioid consumption compared to thoracic epidural analgesia after minimally invasive repair of pectus excavatum. *Medicine*. 2022 Aug 5;101(31):e29773.
125. Lai K, Notrica DM, McMahan LE, Kang P, Molitor MS, Egan JC, et al. Cryoablation in 350 Nuss Procedures: Evolution of Hospital Length of Stay and Opioid Use. *J Pediatr Surg*. 2023 Aug;58(8):1435–9.
126. Bundrant NT, Sayrs LW, Ostlie D, Lee J, Egan C, Molitor M, et al. Infectious complications of intercostal nerve cryoablation mediated by perioperative hypothermia during pediatric Nuss procedure. *J Pediatr Surg*. 2022 Jun 1;57(6):1083–6.
127. Morikawa N, Laferriere N, Koo S, Johnson S, Woo R, Puapong D. Cryoanalgesia in Patients Undergoing Nuss Repair of Pectus Excavatum: Technique Modification and Early Results. *Journal of Laparoendoscopic and Advanced Surgical Techniques*. 2018 Sep 1;28(9):1148–51.
128. Park R, Coomber M, Gilron I, Shanthanna H. Cryoanalgesia for postsurgical pain relief in adults: A systematic review and meta-analysis. Vol. 69, *Annals of Medicine and Surgery*. Elsevier Ltd; 2021.
129. 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. *Journal of Surgical Research*. 2018 Nov 1;231:217–23.
130. Tait AR, Malviya S. Anesthesia for the Child with an Upper Respiratory Tract Infection: Still a Dilemma? *Anesth Analg*. 2005 Jan;100(1):59–65.
131. Parrado R, Lee J, McMahan LE, Clay C, Powell J, Kang P, et al. The Use of Cryoanalgesia in Minimally Invasive Repair of Pectus Excavatum: Lessons Learned. *Journal of Laparoendoscopic & Advanced Surgical Techniques*. 2019 Oct 1;29(10):1244–51.
132. Rook JM, Lee LK, Wagner JP, Sullins VF, Lee SL, Shekherdimian S, et al. Six Years of Quality Improvement in Pectus Excavatum Repair: Implementation of Intercostal Nerve Cryoablation and ERAS Protocols for Patients Undergoing Nuss Procedure. *J Pediatr Surg*. 2025 Feb;60(2):161634.
133. Echeverria-Villalobos M, Stoicea N, Todeschini AB, Fiorda-Diaz J, Uribe AA, Weaver T, et al. Enhanced Recovery After Surgery (ERAS). *Clin J Pain*. 2020 Mar;36(3):219–26.

134. Homma T, Doki Y, Yamamoto Y, Ojima T, Shimada Y, Kitamura N, et al. Efficacy of 50 mg pregabalin for prevention of postoperative neuropathic pain after video-assisted thoracoscopic surgery and thoracotomy: a 3-month prospective randomized controlled trial. *J Thorac Dis.* 2019 Mar;11(3):694–701.
135. Zhang L, Zhang H. The efficacy of pregabalin for pain control after thoracic surgery: a meta-analysis. *J Cardiothorac Surg.* 2024 Jan 3;19(1):4.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Flujograma de aplicación de crioanalgesia



## Apéndice 2. Esquema farmacológico multimodal para el manejo perioperatorio del MIRPE

### ESQUEMA FARMACOLÓGICO MULTIMODAL

#### FASE PREOPERATORIA (-7 a 0 días)

##### Neuromodulación preventiva

- **Gabapentina:** 100 mg c/ 8h x 3 días → 200 mg c/8h
- **Pregabalina:** 50 mg c/8h x 3 días → 75 mg c/8h

#### FASE INTRAOPERATORIA

##### Inducción

- **Midazolam:** 0.03-0.05 mg/kg
- **Propofol:** 2-3 mg/kg
- **Fentanilo:** 1-2 µg/kg
- **Rocuronio:** 0.6-1 mg/kg o **Atracurio:** 0.5mg/kg
- **Dexametasona:** 4-8 mg

##### Mantenimiento

- **Sevofurano:** 0.8-1.2 CAM
- o **Propofol TCI:** 3-4 µg/mL estimados

#### FASE INTRAOPERATORIA

##### Analgesia IV multimodal

- **Paracetamol:** 15 mg/kg
- **Metamizol:** 30 mg/kg (máx. 2 g)
- **Diclofenaco:** 1-2 mg/kg (máx. 75 mg)
- **Morfina:** 0.1 mg/kg
- **Fentanilo:** 1-5 µg/kg en bolos

##### Infusiones coadyuvantes

- **Ketamina:** 0.25 mg/kg bolos → 0.1-0.3 mg/kg/h
- **Lidocaina:** 1-2 mg/kg/h
- **Magnesio:** 30-50 mg/kg bolos → 10 mg/kg/h
- **Dexmedetomidina:** 0.5-1 µg/kg bolos → 0.2-0.5 µg/kg/h

##### Antieméticos

- **Granisetron:** 0.04 mg/kg
- **Droperidol:** 0.625-1.25 mg

#### FASE POSTOPERATORIA (0-72 h)

##### Bomba elastomérica IV (48 h)

- **Metamizol:** 4-6 g/día
- **Morfina:** 10-15 mg/día
- **Granisetron:** 3 mg/día

##### Regional continua (si catéter)

- **Bupivacaína:** 0.1-0.125% a 5 mL/h

##### Sistémicos de apoyo

- **Paracetamol:** 1 g c/6-8h
- **Ibuprofeno:** 400 mg c/8h
- **Gabapentina:** 300 mg c/8h
- **Morfina IV rescate:** bolos 2 mg c/5 -10 min

#### FASE DOMICILIARIA (10-14 días)

- **Paracetamol:** 500-1000 mg c/6-8h
- **Ibuprofeno:** 400 mg c/8h
- **Gabapentina:** 300 mg c/8h x 1 semana
- **Acetaminofén + Codeína (500 mg + 30 mg):**
  - 1 tableta cada 12 h solo como rescate

## ANEXOS

## Anexo 1. Licencia de publicación

	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA	SEP Sistema de Estudios de Posgrado
<b>Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.</b>		
Yo, <u>Valerie Quesada Vargas</u> con cédula de identidad <u>11453 0414</u> , en mi condición de autor del TFG titulado <u>Propuesta de protocolo analgésico multimodal con implementación de cricoanalgesia para pacientes sometidos a técnica de NUSS en el Hospital Calderón Guardia.</u>		
Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI <input checked="" type="checkbox"/> NO * <input type="checkbox"/>		
*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: _____ año (s).		
Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.		
Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.		
<b>INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:</b>		
Nombre Completo: <u>Valerie Quesada Vargas</u>		
Número de Carné: <u>A94935</u> Número de cédula: <u>114530414</u>		
Correo Electrónico: <u>vdqv240@hotmail.com</u>		
Fecha: <u>15/12/25</u> Número de teléfono: <u>8518-7400</u>		
Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): <u>Ariana Corella Fallas</u>		
<b>FIRMA ESTUDIANTE</b>		
<small>Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.</small>		

## Anexo 2. Carta de aprobación de la tutora

14 de diciembre, 2025.

Universidad de Costa Rica  
Programa de especialidades médicas

### CARTA DE AVAL DE REVISIÓN DE AVANCE DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Yo, **Ariana Corella Fallas** en mi calidad de tutora del Trabajo Final de Graduación titulado: **“Propuesta de protocolo analgésico multimodal con implementación de crioanalgesia para pacientes sometidos a técnica de Nuss en el Hospital Calderón Guardia”**, elaborado por la estudiante **Valerie Quesada Vargas** del programa de **Especialidad en Anestesiología y Recuperación**, hago constar por medio de la presente que he revisado el avance correspondiente y que este cumple con lo estipulado en las normativas institucionales para su entrega en esta etapa.

Atentamente,

Firma digital

ARIANA  
PAOLA  
CORELLA  
FALLAS  
(FIRMA)

Firmado  
digitalmente por  
ARIANA PAOLA  
CORELLA FALLAS  
(FIRMA)  
Fecha: 2025.12.15  
17:54:23 -06'00'

### Anexo 3. Carta de aprobación de lectora

14 de diciembre, 2025.

Universidad de Costa Rica  
Programa de especialidades médicas

#### CARTA DE AVAL DE REVISIÓN DE AVANCE DE TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Yo, Tiny Rodríguez Aragonés en mi calidad de lectora del Trabajo Final de Graduación titulado: **“Propuesta de protocolo analgésico multimodal con implementación de crianalgesia para pacientes sometidos a técnica de Nuss en el Hospital Calderón Guardia.”**, elaborado por la estudiante **Valerie Quesada Vargas** del programa de **Especialidad en Anestesiología y Recuperación**, hago constar por medio de la presente que he revisado el avance correspondiente y que este cumple con lo estipulado en las normativas institucionales para su entrega en esta etapa.

Atentamente,



Dra Tiny Rodriguez Aragonés  
Médico Asistente Especialista