

Revista de Educación en Cuidados Críticos

www.reducritic.com

Volumen 3, Número 2 | Julio-Diciembre 2024 | ISSN: 2938-1304

REduCrític

Editorial

Vamos por buen camino. Indexación en Latindex y OpenAlex. REduCrític

59

Noel J. Díaz-Robles

Artículo original

Efecto del valor de poder mecánico en los días libres de soporte ventilatorio invasivo 61

Enrique I. Orellana-Guevara y Óscar A. Santos-Urbina

Artículos de revisión

Presión de conducción en el síndrome de dificultad respiratoria aguda, estado actual del conocimiento: una revisión narrativa 68

Manuel S. Pérez-Díaz y Regina Solares-Zendejas

Equity in critical care: a review of artificial intelligence driven solutions 77

Venkata Buddhavarapu, Harpreet Singh-Grewal, Gagandeep Dhillon, and Rahul Kashyap

Abordaje del paro cardíaco transoperatorio en adultos durante procedimientos neuroquirúrgicos. Artículo de revisión 85

Luis E. Arévalo-Gutiérrez

Caso clínico

Infarto agudo al miocardio secundario a trauma 98

Melissa S. Zelaya-Rodríguez, Kevin I. Villatoro-Guzmán, Nelson E. García-Álvarez y Moisés E. Rivera-Sánchez

Con la colaboración no condicionada de:

Órgano oficial de
ASALMECCI



Miembro total de:



World Federation of Societies of
Intensive and Critical Care Medicine



Avalado por:



PERMANYER
www.permanyer.com



Revista de Educación en Cuidados Críticos

www.reducritic.com

Volumen 3, Número 2 | Julio-Diciembre 2024 | ISSN: 2938-1304

REduCrític

EDITOR EN JEFE / EDITOR IN CHIEF

Noel de Jesús Díaz Robles

Hospital Médico-Quirúrgico, Instituto Salvadoreño del Seguro Social (ISSS)
Programa de Medicina Crítica del ISSS
Presidente de la ASALMECCI
San Salvador, El Salvador

COEDITOR / COEDITOR

Mariano A. Chávez Andino

Unidad de Medicina Crítica,
Hospital Médico-Quirúrgico, ISSS
San Salvador El Salvador

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES / INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Fabio A. Varón Vega

Fundación Neumológica Colombiana y Fundación CardiInfantil
Bogotá, Colombia

Felipe A. Machuca Contreras

Universidad Autónoma de Chile, Santiago, Chile

Gloria Rodríguez Vega

MD, FACP, FCCP, FNCS, MCCM, HIMA
Caguas, Puerto Rico

José de J. Rincón Salas

Unidad de Terapia Intensiva Postquirúrgica Cardiovascular.
Centro Médico La Raza
Ciudad de México, México

Miguelina Pichardo Viñas

Hospital Regional Universitario José María Cabral y Báez/Clinica
Instituto Materno-Infantil y Especialidades
San Martín de Porres
San Carlos, República Dominicana

Carlos A. Lescano Alva

Sociedad Peruana de Medicina
Intensiva SOPEMI/Hospital Edgardo Rebagliati EsSalud
Lima, Perú

Carlos J. Sánchez Escalante

Unidad de Cuidados Intensivos,
Hospital General IESS
Quevedo, Ecuador

Luis A. Gorordo Delsol

Unidad de Cuidados Intensivos Adultos,
Hospital Juárez de México
Ciudad de México, México

Jorge Hidalgo

General ICU and COVID-19 Unit,
Belize Healthcare Partners/World Federation
of Intensive and Critical Care
Belice, Belice

Gonzalo Batres Baires

Medicina Interna, UCI, Gastroenterología y
Endoscopia, Oberarzt Asklepios Klinik
Múnich, Alemania

Alfredo A. Matos Adames

Cirugía General, Complejo Hospitalario de la
Caja del Seguro Social FEPIMCTI
Ciudad de Panamá, Panamá

José R. Arévalo Cerón

Hospital Universitario Son Espases
Palma de Mallorca, España

Ana M. Uribe Hernández

Servicio de Epidemiología Clínica,
Hospital Santa Clara
Bogotá, Colombia

Diego A. Insignares Niño

Promedan, Neumomed, Helpharma IPS
Medellín, Colombia

Ricardo Aguilar Padilla

Instituto Mexicano del Seguro Social,
Hospital General de Zona No. 71, Chalco,
Estado de México, México

Aurio Fajardo Campoverdi

Chair of International Mechanical Ventilation Group (WeVent),
Viña del Mar, Chile

Carmen L. Chica Meza

Asociación Colombiana de Medicina Crítica y
Cuidados Intensivos (AMCI), Cartagena, Colombia

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES / NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Elmer W. Mendoza Rodríguez

Dirección de Epidemiología,
MINSAL
San Salvador

Claudia B. Delgado Zavaleta

Dirección de Epidemiología,
MINSAL
San Salvador

Francisco A. Ruiz Yelaya

Unidad de Terapia Intensiva,
Hospital de El Salvador
San Salvador

Guillermo E. Rascón Ramírez

Coordinación Nacional de Medicina Crítica, ISSS
San Salvador

Carlos E. Orellana Jiménez

Servicio de Medicina Crítica,
Hospital General del ISSS
San Salvador

Victor E. Segura Lemus

Medicina de Emergencias,
Universidad Dr. Alberto Masferrer
San Salvador

Nelson E. García Álvarez

Unidad de Medicina Crítica,
Hospital Nacional de San Miguel
San Miguel

Víctor D. Franco Escobar

Departamento de Docencia, ISSS
San Salvador

Wilfredo E. López Rivas

Departamento de Medicina Crítica,
Hospital de El Salvador
San Salvador

Flor de M. Castro Rodríguez-Gallo

Departamento de Medicina Crítica,
Hospital de El Salvador
San Salvador

Andrea M. Pimentel Campos

Departamento de Medicina Crítica y Cuidados
Intensivos,
Hospital Nacional Rosales
San Salvador

Miguel A. López Granado

Departamento de Medicina Intensiva,
Hospital Médico-Quirúrgico, ISSS
San Salvador

Miguel E. Blanco Rodríguez

Departamento de Medicina Intensiva,
Hospital General del ISSS
San Salvador

Jaime E. Sánchez Rivera

Departamento de Medicina Intensiva,
Hospital Médico-Quirúrgico, ISSS
San Salvador

Ricardo J. Durán Gallegos

Departamento de Medicina Intensiva,
Hospital El Salvador
San Salvador

Los trabajos originales deberán ser depositados en su versión electrónica en el siguiente URL:

<https://publisher.reducritic.permanyer.com>



Esta obra se presenta como un servicio a la profesión médica. El contenido de la misma refleja las opiniones, criterios y/o hallazgos propios y conclusiones de los autores, quienes son responsables de las afirmaciones. En esta publicación podrían citarse pautas posológicas distintas a las aprobadas en la Información Para Prescribir (IPP) correspondiente. Algunas de las referencias que, en su caso, se realicen sobre el uso y/o dispensación de los productos farmacéuticos pueden no ser acordes en su totalidad con las aprobadas por las Autoridades Sanitarias competentes, por lo que aconsejamos su consulta. El editor, el patrocinador y el distribuidor de la obra, recomiendan siempre la utilización de los productos de acuerdo con la IPP aprobada por las Autoridades Sanitarias.



Permanyer
Mallorca, 310
08037 Barcelona (Cataluña), España
permanyer@permanyer.com

Temístocles, 315
Col. Polanco, Del. Miguel Hidalgo
11560 Ciudad de México, México
mexico@permanyer.com

ISSN: 2938-1304
Ref.: 10057AMEX242



www.permanyer.com

Reproducciones con fines comerciales

Sin contar con el consentimiento previo por escrito del editor, no podrá reproducirse ninguna parte de esta publicación, ni almacenarse en un soporte recuperable ni transmitirse, de ninguna manera o procedimiento, sea de forma electrónica, mecánica, fotocopando, grabando o cualquier otro modo, para fines comerciales.

Revista de Educación en Cuidados Críticos es una publicación *open access* con licencia *Creative Commons* CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Las opiniones, hallazgos y conclusiones son las de los autores. Los editores y el editor no son responsables y no serán responsables por los contenidos publicados en la revista.

© 2024 Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI). Publicado por Permanyer.

Vamos por buen camino. Indexación en Latindex y OpenAlex. REduCrític

We're on the right track. Indexing in Latindex and OpenAlex. REduCrític

Noel J. Díaz-Robles 

Medicina Crítica, Instituto Salvadoreño del Seguro Social, Facultad de Medicina, Universidad de El Salvador; Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI). San Salvador, El Salvador

La *Revista de Educación en Cuidados Críticos* (REduCrític) es el órgano oficial de difusión de la Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI) y el órgano de expresión del Consejo Centroamericano y del Caribe de Terapia Intensiva (COCECATI). Es una publicación electrónica, semestral, *open access* (abierta sin coste para autores y lectores) que, tras revisión por pares, publica artículos científicos inéditos y originales, artículos de revisión y secciones especiales (estas últimas, exclusivamente por invitación), relacionadas con aspectos clínicos, quirúrgicos y básicos de la medicina crítica y de cuidados intensivos. Iniciamos desde el año 2022 como una meta principal de la junta directiva, y durante este camino hemos logrado publicar tres volúmenes, convirtiéndonos en la única revista de educación en El Salvador bajo la dirección de una asociación educativa como la ASALMECCI.

La REduCrític ha conseguido en este periodo dos indexaciones importantes: en el directorio y catálogo 2.0 de Latindex¹ (Fig. 1) y en OpenAlex² (Fig. 2). La indexación de nuestra revista nos ofrece varias ventajas significativas, tanto para los autores como para los investigadores, así como para la ASALMECCI:

- Visibilidad y acceso global: al estar indexada en bases de datos como Latindex y OpenAlex, REduCrític tiene más posibilidades de ser encontrada por investigadores de todo el mundo.



Figura 1. Logotipo de Latindex - Catálogo 2.0.



Figura 2. Logotipo de OpenAlex.

- Aumento de citas: al facilitar el acceso, se incrementan las probabilidades de que los artículos publicados en la revista sean citados en otros estudios, aumentando su impacto académico.
- Calidad y reconocimiento: la inclusión en bases de datos reconocidas implica un proceso de revisión rigurosa, lo que indica que la revista cumple con ciertos estándares de calidad en sus procesos editoriales y de revisión. Las revistas indexadas suelen ser valoradas positivamente en evaluaciones académicas, con lo que mejora la reputación de la ASALMECCI y de los investigadores involucrados.
- Fácil búsqueda y recuperación de información: las bases de datos indexadas permiten a los usuarios

Correspondencia:

Noel J. Díaz-Robles

E-mail: dr.diazrobles86@gmail.com

Fecha de recepción: 14-10-2024

Fecha de aceptación: 11-11-2024

DOI: 10.24875/RECC.M24000004

Disponible en internet: 30-12-2024

REduCrític. 2024;3(2):59-60

www.reducritic.com

2938-1304 / © 2024 Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI). Publicado por Permanyer. Éste es un artículo *open access* bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

buscar artículos por temas, palabras clave o autores, entre otros, haciendo que sea más fácil encontrar investigaciones relevantes. Muchas bases de datos actualizan regularmente su contenido, por lo que los usuarios pueden acceder a los artículos más recientes en su área de estudio.

- Aumento del factor de impacto: las revistas indexadas en bases de datos reconocidas suelen ser evaluadas por métricas como el factor de impacto, que mide la frecuencia con que se citan sus artículos. Esto ayuda a posicionar mejor la revista en el ámbito científico y puede atraer a autores de alto nivel.

En resumen, la indexación en bases de datos especializadas es fundamental para garantizar la calidad, la visibilidad y la accesibilidad de las investigaciones publicadas, lo cual beneficia a la comunidad científica en general y contribuye al avance de la ciencia médica.

La REduCrític seguirá esforzándose por cumplir con los requisitos indispensables de nuestra revisión por

pares³ y con los requisitos establecidos por el Comité Internacional de Editores de Revistas Médicas (ICMJE) para la autoría⁴.

Con todo lo anterior expuesto, nuestra revista se ha posicionado como una de las principales en cuidados intensivos dentro de la región Centroamericana y del Caribe.

Agradecemos a todo el comité editorial y al comité de revisión⁵, pues sin ellos todo esto no sería posible.

Bibliografía

1. Latindex. Ficha. Disponible en: <https://latindex.org/latindex/ficha/28506>.
2. OpenAlex. Source: S4387284687. Disponible en: <https://openalex.org/sources/s4387284687>.
3. REduCrític. Proceso de revisión. Editorial & Peer Review. Disponible en: <https://www.reducritic.com/seccion.php?id=68&sc=proceso-de-revision---editorial-&-peer-review>.
4. International Committee of Medical Journal Editors (ICMJE). Defining the role of authors and contributors. Disponible en: <https://www.icmje.org/recommendations/browse/roles-and-responsibilities/defining-the-role-of-authors-and-contributors.html#two>.
5. REduCrític. Comité editorial. Disponible en: <https://www.reducritic.com/comite-editorial.php>.

Efecto del valor de poder mecánico en los días libres de soporte ventilatorio invasivo

Effect of mechanical power value on days free from invasive ventilatory support

Enrique I. Orellana-Guevara^{ID} y Óscar A. Santos-Urbina^{*ID}

Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI), Universidad de El Salvador, Instituto Salvadoreño del Seguro Social, Hospital Médico Quirúrgico, San Salvador, El Salvador

Resumen

Introducción: El poder mecánico (PM) conceptualmente se refiere a la energía entregada por unidad de tiempo al sistema respiratorio por parte del ventilador mecánico, nace como un parámetro integrador que refleja la interacción del ventilador mecánico y el pulmón del paciente, es decir el papel que desempeña cada uno de los componentes que se configuran en el ventilador, así como también de qué manera recibe esta carga de energía el sistema respiratorio, en función de sus características mecánicas. **Objetivo:** Determinar el efecto de un valor de PM menor de 12 J/min en los días de ventilación mecánica invasiva, en pacientes de las unidades de terapia intensiva del Hospital Médico Quirúrgico y el Hospital General del Instituto Salvadoreño del Seguro Social. **Métodos:** Estudio observacional y analítico, obteniendo los datos de los expedientes clínicos de los pacientes ingresados en las unidades de terapia intensiva y los días libres de ventilación mecánica. **Resultados:** Se obtuvieron los datos de 140 pacientes (100 ingresados en la unidad de cuidados intensivos del Hospital Médico Quirúrgico y 40 ingresados en la unidad de cuidados intensivos del Hospital General) y se demostró la asociación existente entre el valor del PM tomando como punto de corte 12 J/min y los días libres de ventilador. **Conclusiones:** El PM es un parámetro crucial en la ventilación mecánica, ya que un valor elevado se asocia con una reducción significativa en los días libres de ventilación, lo que indica peores resultados clínicos.

Palabras clave: Poder mecánico. Ventilación mecánica invasiva. Días libres de ventilación mecánica invasiva. Peso pulmonar. Elastancia pulmonar.

Abstract

Introduction: Mechanical power (MP) conceptually refers to the energy delivered per unit of time to the respiratory system by the mechanical ventilator. It was created as an integrating parameter that reflects the interaction of the mechanical ventilator and the patient's lung, that is, the role played by each of the components that are configured in the ventilator, as well as how the respiratory system receives this energy load, based on its mechanical characteristics. **Objective:** To determine the effect of a PM value of less than 12 J/min on days of invasive mechanical ventilation in patients in the intensive care units of the Medical-Surgical Hospital and the General Hospital of the Salvadoran Social Security Institute. **Methods:** Observational and analytical study, obtaining data from the clinical records of patients admitted to the intensive care units and days free of mechanical ventilation. **Results:** Data were obtained from a total of 140 patients (100 admitted to the intensive care

*Correspondencia:

Óscar A. Santos-Urbina
E-mail: oscarx911@gmail.com

Fecha de recepción: 09-10-2024

Fecha de aceptación: 07-11-2024

DOI: 10.24875/RECC.24000019

Disponible en internet: 30-12-2024

REduCritic. 2024;3(2):61-67

www.reducritic.com

2938-1304 / © 2024 Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI). Publicado por Permanyer. Éste es un artículo open access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

unit of the Medical Surgical Hospital and 40 admitted to the intensive care unit of the General Hospital), and the association between the PM value taking 12 J/min as a cut-off point and ventilator-free days was demonstrated. **Conclusions:** PM is a crucial parameter in mechanical ventilation, since a high value is associated with a significant reduction in ventilator-free days, indicating worse clinical outcomes.

Keywords: Mechanical power. Invasive mechanical ventilation. Days free of invasive mechanical ventilation. Lung weight. Lung elastance.

Introducción

La ventilación invasiva es considerada un «mal necesario», pero en realidad es un soporte importante dentro del ámbito de la terapia intensiva para la asistencia en pacientes que han perdido autonomía respiratoria, hasta que esta sea restablecida. Pero, así como la ventilación mecánica puede ser de gran aporte, su mal uso puede desencadenar efectos deletéreos tanto pulmonares como sistémicos, conllevando potenciales complicaciones. Sin embargo, debemos resaltar la lesión inducida por el ventilador mecánico (VILI, *ventilator-induced lung injury*), que no es más que una serie de mecanismos potenciadores de daño alveolar, dados directamente por la energía transmitida desde el ventilador mecánico y que van a producir repercusiones locales y sistémicas.

En esa línea de pensamiento nace el poder mecánico (PM) como un parámetro integrador que refleja la interacción del ventilador mecánico y el pulmón del paciente, es decir el papel que desempeña cada uno de los componentes que se configuran en el ventilador, así como también de qué manera recibe esta carga de energía el sistema respiratorio, en función de sus características mecánicas. El PM se basa en la percepción de que cada uno de los parámetros que se configuran en el ventilador tienen riesgo de inducir VILI, y que este efecto es sumativo, es decir, que al aumentar la intensidad de tal o cual parámetro va a subir también la energía que el ventilador transmite al sistema respiratorio de forma global. Todo lo anterior se ha investigado en el escenario de pulmones con síndrome de distrés respiratorio agudo (SDRA), pero muy poco se sabe acerca del papel que desempeña este nuevo parámetro (PM) en los pulmones de pacientes sin SDRA, por lo que nos parece bastante atractiva esta propuesta de investigar la relación del PM en pacientes críticos ventilados y sin SDRA.

Generalidades sobre el PM

Desde hace décadas se han realizado esfuerzos en poder dilucidar cuáles son los factores y las bases

fisiopatológicas que contribuyen al daño pulmonar producido por el ventilador mecánico y cuáles serían las medidas efectivas para mitigarlo al máximo; sin embargo, aunque mucho se ha avanzado, aún falta por hacer, es decir, el proceso físico que causa VILI ha sido difícil de precisar. Se sugiere que este proceso es multifactorial e incluye las fuerzas mecánicas a las cuales es sometido el pulmón, la anatomopatología pulmonar e inclusive características no ventilatorias. El estiramiento excesivo, la tensión y la apertura y el cierre del ciclo tidal pueden ser importantes, pero el mecanismo preciso por el cual actúan sigue sin estar claro^{1,2}.

El grupo italiano liderado por Protti y Gattinoni desde hace pocos años ha realizado estudios en animales con tomografía computarizada pulmonar para determinar la interacción de la carga de energía cíclica generada por el ventilador mecánico y el sistema respiratorio en relación con la aparición de VILI, aplicando conceptos de ingeniería para entender los fenómenos ocurridos con diferentes niveles de volumen tidal (*strain* dinámico), distintas presiones transpulmonares (estrés dinámico) y distintos niveles de presión positiva al final de la espiración (PEEP) (estrés y *strain* estáticos) en el pulmón ventilado^{3,4}. En esa línea de pensamiento, el PM es un parámetro integrador que refleja la interacción del ventilador mecánico y el pulmón del paciente, es decir, el papel que desempeña cada uno de los componentes que se configuran en el ventilador a diario, así como también de qué manera recibe esta carga de energía el sistema respiratorio, en función de sus características mecánicas. Este nuevo parámetro integra la mayoría de las variables que se configuran en el ventilador en el momento del manejo del paciente crítico. Se basa en el hecho de que cada parámetro del ventilador (volumen tidal, flujo, PEEP, presión meseta, frecuencia respiratoria, etc.) tiene la potencial capacidad de causar daño pulmonar^{3,4}.

Gattinoni et al. midieron el PM directamente desde un bucle presión/volumen en cerdos que fueron ventilados con diferentes volúmenes tidal, diferentes presiones en la vía aérea y en diferentes condiciones pulmonares, mediante un *software* que puede inferir a

la cabecera del paciente, de forma práctica y sencilla, el PM que se está aplicando en ese momento; de ahí lo valioso y atractivo que podría resultar para el médico intensivista su aplicación en la vida cotidiana⁴.

El PM conceptualmente se refiere a la energía entregada por unidad de tiempo al sistema respiratorio por parte del ventilador mecánico, medida en J/min. Se basa en la percepción de que todos los parámetros que se configuran en el ventilador tienen el riesgo de inducir VILI, y que este efecto es sumativo, es decir, que al aumentar la intensidad de alguna de las variables va a aumentar también la energía que el ventilador transmite al sistema respiratorio de forma global⁵.

Por otro lado, existe una ecuación simplificada, que es la siguiente:

$$PM: 0.098 \times RR \times TV \times (P_{peak} \times \frac{1}{2} DP)$$

donde 0.098 es el factor de conversión de l/cmH₂O a J, *RR* es la frecuencia respiratoria, *TV* es el volumen tidal, *P_{peak}* es la presión pico y *DP* es la diferencia entre la presión meseta y la PEEP total^{4,5}.

Un punto de corte coincidió con el encontrado en un estudio realizado en cerdos por Cressoni et al.⁵ meses atrás, el cual se ve reflejado en un análisis secundario de dos conocidos estudios (PROSEVA y ACCURASYS)^{6,7} que incluyó 787 pacientes con SDRA grave se objetivó un punto de corte de 12 J/min con el cual existe relación con la mortalidad. En el mismo año, en México, Rosas Sánchez et al.⁸ realizaron un pequeño estudio con 40 pacientes, en el que se estableció una asociación independiente y una relación inversa entre el PM y los días libres de ventilador mecánico con un punto de corte de 12 J/min.

Los resultados discordantes evidenciados en los estudios demuestran la necesidad de realizar otros estudios para enriquecer la medicina basada en la evidencia en relación con este aspecto del manejo ventilatorio en los pacientes críticos. Creemos, por tanto, que con este antecedente sería importante investigar si este nuevo parámetro, ya validado en pacientes con SDRA, es útil en el grupo de pacientes que estamos investigando (pacientes críticos ventilados y sin SDRA). Vemos lo valioso que podría ser estudiar a nuestros pacientes con una fórmula que, en realidad, es absolutamente integradora, que refleja la interacción del ventilador y el pulmón del paciente crítico, cualidades que no tiene ningún otro parámetro estudiado hasta la actualidad^{9,10}.

Otros factores que pueden intervenir en la protección pulmonar, además de las características anatómicas y fisiopatológicas del enfermo, son la frecuencia

respiratoria, la magnitud del flujo suministrado, el grado de deformación (*strain*) de las fibras pulmonares, el elongamiento excesivo del tejido funcional (estrés) y la tensión a la que este se somete^{11,12}.

Un reto crucial en la aplicación del PM es la necesidad de ser adaptado a las diferencias de tamaño pulmonar, el grado de no homogeneidad y la distribución local de tensión y deformación. En otras palabras, un mismo PM puede generar efectos diferentes en pulmones sanos o dañados¹³⁻¹⁵. Por tanto, se produce tracción en el esqueleto de la trama alveolar y aumenta el riesgo de ruptura, sobredistensión, mayor *strain* y volutrauma, barotrauma y biotrauma. Parece ser de mayor relevancia clínica encontrar un valor del PM con el que la ventilación mecánica asistida pueda considerarse segura, o por encima del cual pueda resultar peligrosa¹⁶⁻¹⁸.

Datos experimentales recientes han revelado que, cuando el PM aumenta, la frecuencia respiratoria o el nivel de PEEP son capaces de promover inflamación pulmonar y edema. En un estudio que incluyó 1705 pacientes con ventilación mecánica asistida, el PM se asoció de forma independiente con progresión a SDRA^{19,20}.

Método

Tipo de estudio y diseño general de la investigación

Estudio observacional y analítico que determina el efecto de un valor de PM < 12 J/min en los días de ventilación mecánica invasiva, en pacientes de las unidades de terapia intensiva, utilizando la prueba rho de Spearman.

Universo

Pacientes sin patología pulmonar crónica ingresados en las unidades de terapia intensiva del Hospital Médico Quirúrgico y Hospital General del Instituto Salvadoreño del Seguro Social que requirieron soporte ventilatorio invasivo entre marzo de 2022 y marzo de 2023.

Muestra

Se tomó el 100% de los pacientes sin patología pulmonar crónica ingresados en las unidades de terapia intensiva que requirieron soporte ventilatorio invasivo entre marzo de 2022 y marzo de 2023.

Criterios de inclusión

- Edad mayor de 18 años.
- Paciente ingresado en la unidad de cuidados intensivos.
- Paciente en ventilación mecánica invasiva manejado en modo volumen control.

Criterios de exclusión

- Patología pulmonar crónica.
- Paciente que fue manejado con ventilación mecánica invasiva más de 24 horas fuera de la unidad de cuidados intensiva.
- Paciente que fue manejado con un modo no convencional de ventilación mecánica invasiva (Bi-Level, BiPAP).
- Mujeres embarazadas.
- Pacientes en cuidados paliativos.

Se obtuvieron los datos de un total de 140 pacientes (100 ingresados en la unidad de cuidados intensivos del Hospital Médico Quirúrgico y 40 ingresados en la unidad de cuidados intensivos del Hospital General), de los que la mayoría eran hombres (52.9%) y más de la mitad (57.8%) se encontraban entre los 41 y 70 años. El diagnóstico principal fue sepsis, seguido de choque cardiogénico y trauma.

Proceso de recolección de los datos

Los datos que se recolectaron fueron el sexo, la edad, el puntaje APACHE II al ingreso y datos antropométricos (peso y talla) del paciente obtenidos del expediente clínico que se lleva en terapia intensiva, así como de los pacientes que se mantuvieron ingresados durante el estudio, realizando la medición en las primeras 24 horas de ingreso a terapia intensiva.

Resultados

Se obtuvieron los datos de 140 pacientes (100 ingresados en la unidad de cuidados intensivos del Hospital Médico Quirúrgico y 40 ingresados en la unidad de cuidados intensivos del Hospital General), de los que la mayoría eran hombres (52.9%) y más de la mitad (57.8%) se encontraban entre los 41 y 70 años. El diagnóstico principal fue sepsis, seguido de choque cardiogénico y trauma (Tabla 1).

El grupo de edad predominante fue el de 51 a 60 años, seguido por los grupos de 61 a 70 años, 71 a 80 años y 41 a 50 años. Los demás grupos etarios

Tabla 1. Distribución de pacientes ingresados en las unidades de cuidados intensivos del Hospital Médico Quirúrgico (HMQ) y el Hospital General (HG) bajo ventilación mecánica de marzo de 2022 a marzo de 2023, por sexo

Sexo	HMQ	HG	Total	%
Femenino	51	15	66	47.1
Masculino	49	25	74	52.9
Total	100	40	140	-

Tabla 2. Distribución de pacientes ingresados en las unidades de cuidados intensivos del Hospital Médico Quirúrgico (HMQ) y el Hospital General (HG) bajo ventilación mecánica de marzo de 2022 a marzo de 2023, por edad

Rango edad (años)	HMQ	HG	Total	%
18-30	10	8	18	12.86
31-40	5	9	14	10.00
41-50	13	6	19	13.57
51-60	25	8	33	23.57
61-70	26	3	29	20.71
71-80	16	4	20	14.29%
> 80	5	2	7	5.00%
Total	100	40	140	100

presentan una cantidad significativamente menor de pacientes (Tabla 2).

En relación con la distribución de pacientes en las unidades de terapia intensiva tanto del Hospital Médico Quirúrgico como del Hospital General, se observa que la mayoría presentan un puntaje APACHE II > 30 puntos (47.8%). Este grupo es seguido por aquellos con puntajes entre 20 y 29 (43.5%), mientras que una menor proporción de pacientes se encuentra en el rango de 10 a 19 puntos (7.86%) (Tabla 3).

Las patologías más frecuentes en las unidades de cuidados intensiva del Hospital Médico Quirúrgico y del Hospital General son sepsis (63%), otras (15%), neurocríticos (14.2%), trauma (19%) y finalmente choque cardiogénico (12.4%) (Tabla 4).

En cuanto a la distribución de pacientes con días libres de ventilación mecánica y PM, aquellos con PM normal obtuvieron 21.7 días libres de ventilación mecánica invasiva y aquellos con PM anormal obtuvieron 18.3 días libres de ventilación mecánica invasiva (Tabla 5).

Tabla 3. Distribución de pacientes ingresados en las unidades de cuidados intensivos del Hospital Médico Quirúrgico (HMQ) y el Hospital General (HG) bajo ventilación mecánica de marzo de 2022 a marzo de 2023, por puntaje APACHE II

APACHE II	Mortalidad	HMQ	HG	Total	%
0-9	4-8%	1	0	1	0.71
10-19	15-25%	9	2	11	7.86
20-29	40-55%	49	12	61	43.57
> 30	> 75%	41	26	67	47.86

Tabla 4. Distribución de pacientes ingresados en las unidades de cuidados intensivos del Hospital Médico Quirúrgico (HMQ) y el Hospital General (HG) bajo ventilación mecánica de marzo de 2022 a marzo de 2023 por patologías

Diagnósticos	HMQ	HG	Total	%
Sepsis	47	16	63	45.00
Trauma	3	16	19	13.57
Neurocríticos	14	6	20	14.29
Choque cardiogénico	17	0	17	12.14
Otros	19	2	21	15.00
Total	100	40	140	100

Tabla 5. Distribución de pacientes con días libres de ventilación mecánica y poder mecánico en las unidades de cuidados intensivos del Hospital Médico Quirúrgico y el Hospital General

	N.º	Promedio (días)
Total 28 días × 140 pacientes	3920	
PM normal		
Pacientes	56	
Días con VM	352	6.3
Días libres de VM	1216	21.7
PM anormal		
Pacientes	84	
Días con VM	816.7	9.7
Días libres de VM	1,535.30	18.3

PM: poder mecánico; VM: ventilación mecánica.

En la [figura 1](#) se evidencia la correlación entre el menor valor del PM y el mayor número de días libres de ventilación mecánica. Asimismo, al incrementarse el valor del PM se observa un aumento en los días de ventilación mecánica invasiva.

Discusión

Nuestro estudio muestra que más de la mitad de los pacientes bajo ventilación mecánica son hombres (52.9%), con una discreta diferencia en comparación con otras investigaciones, como la de Estrada-Álava et al.⁸, que tuvo un 61% de pacientes de sexo masculino. Además, en relación al estudio previamente citado, los diagnósticos más frecuentes fueron sepsis no pulmonar y neurocríticos, siendo comparable con nuestros resultados, ya que nuestros principales diagnósticos fueron sepsis y pacientes neurocríticos. En las instituciones de Quito se ve reflejada la utilización de presión control como modo ventilatorio predominante, a diferencia de nuestras unidades críticas, donde se utiliza predominantemente volumen control, siendo importante mencionar que la diferencia de PM en relación con ambos modos es superior para presión control sobre volumen control por la forma de entrega del volumen tidal, incrementando dicha variable cuando se coloca pausa inspiratoria²¹.

Como hallazgo principal en nuestro estudio, se comprobó la existencia de una relación inversa entre el valor del PM y el número de días libres de ventilación mecánica, con un coeficiente de correlación de Spearman de 0.85, siendo esta una alta correlación; tomando como punto de corte 12 J/min, a mayor PM, menor número de días libres de ventilación mecánica. Hallazgos similares reportaron Rosas Sánchez et al.⁷, con un área bajo la curva del PM para la predicción de días libres de ventilación mecánica de 0.75 (intervalo de confianza del 95%: 0.59-0.90; $p = 0.007$).

Sin embargo, nuestro estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas. Primero, el tamaño de la muestra, aunque suficiente para detectar tendencias significativas, podría ser incrementado en futuros estudios para robustecer los hallazgos. Además, la heterogeneidad de la población estudiada, en términos de diagnósticos y gravedad de la enfermedad, puede introducir una variabilidad que no fue controlada en el análisis. Al mismo tiempo, la población de nuestro estudio contaba con altos puntajes APACHE II de gravedad de su enfermedad crítica (> 90% de los pacientes tenían > 20 puntos), por lo que la gravedad de la enfermedad puede generar mayor número de días de ventilación mecánica y no solo un PM > 12 J/min.

Futuras investigaciones deberían enfocarse en validar estos hallazgos en poblaciones más grandes y específicas, así como explorar la relación del PM con otros parámetros ventilatorios y resultados clínicos.

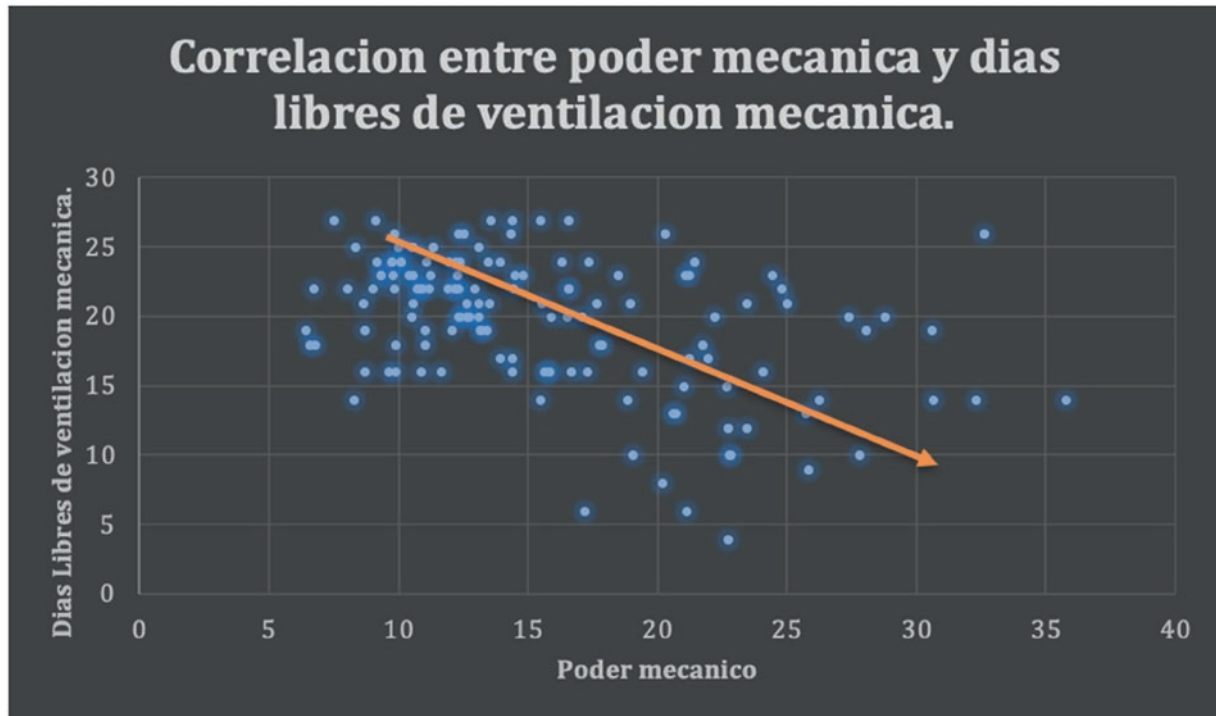


Figura 1. Correlación entre el poder mecánico y los días libres de ventilación mecánica.

Conclusiones

El presente estudio reafirma que el PM es un parámetro crucial en la ventilación mecánica, ya que un PM elevado se asocia con una reducción significativa en los días libres de ventilación, lo que indica peores resultados clínicos. La sepsis fue el diagnóstico principal en los pacientes, representando el 45% de los casos. Esto resalta la importancia de establecer estrategias específicas para el manejo de esta condición en las unidades de cuidados intensivos. El umbral de 12 J/min de PM, considerado crítico en estudios previos, fue validado en nuestra cohorte, demostrando su aplicabilidad y relevancia clínica para predecir el pronóstico de los pacientes bajo ventilación mecánica. La facilidad de cálculo del PM a pie de cama y su relevancia clínica destacan la necesidad de su implementación sistemática en la práctica clínica para una mejor individualización de las estrategias de ventilación mecánica y reducir las complicaciones. Es fundamental realizar estudios adicionales en poblaciones más amplias y diversas para validar estos hallazgos, y explorar la relación del PM con otros parámetros ventilatorios y resultados clínicos.

Financiamiento

Los autores declaran que este trabajo se realizó con recursos propios.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Consideraciones éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad, consentimiento informado y aprobación ética. Los autores han seguido los protocolos de confidencialidad de su institución, han obtenido el consentimiento informado de los pacientes, y cuentan con la aprobación del Comité de Ética. Se han seguido las recomendaciones de las guías SAGER, según la naturaleza del estudio.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial.

Los autores declaran que no utilizaron ningún tipo de inteligencia artificial generativa para la redacción de este manuscrito.

Bibliografía

- Serpa Neto A, Deliberato R, Johnson A, Bos L, Amorim P, Pereira S, et al. Mechanical power of ventilation is associated with mortality in critically ill patients: an analysis of patients in two observational cohorts. *Intensive Care Med.* 2018;44:1914-22.
- Santos RS, Maia LA, Oliveira MV, Santos CL, Moraes L, Pinto EF, et al. Biologic impact of mechanical power at high and low tidal volumes in experimental mild acute respiratory distress syndrome. *Anesthesiology.* 2018;128:1193-206.
- Protti A, Maraffi T, Milesi M, Votta E, Santini A, Pugni P, et al. Role of strain rate in the pathogenesis of ventilator induced lung edema. *Crit Care Med.* 2016;44:e838-45.
- Gattinoni L, Carlesso E, Caironi P. *Curr Opin Crit Care.* 2012;18:42-7.
- Cressoni M, Gotti M, Chiurazzi C, Massari D, Algieri I, Amini M, et al. Mechanical power and development of ventilator-induced lung injury. *Anesthesiology.* 2016;124:1100-8.
- Guérin, C., Reigner, J., Richard, J., Beuret, P., Gacouin, A., Boulain, T., Mercier, E., Badet, M., Mercat, A., Baudin, O., Clavel, M., Chatellier, D., Jaber, S., Rosselli, S., Mancebo, J., Sirodot, M., Hilbert, G., Bengler, C., Richecoeur, J., ... Ayzac, L. (2013). Prone Positioning in Severe Acute Respiratory Distress Syndrome. *New England Journal Of Medicine*, 368(23), 2159-2168. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1214103>.
- Papazian, L., Forel, J., Gacouin, A., Penot-Ragon, C., Perrin, G., Loun-dou, A., Jaber, S., Arnal, J., Perez, D., Seghboyan, J., Constantin, J., Courant, P., Lefrant, J., Guérin, C., Prat, G., Morange, S., Roch, A. (2010). Neuromuscular Blockers in Early Acute Respiratory Distress Syndrome. *New England Journal of Medicine*, 363(12), 1107-1116. <https://doi.org/10.1056/nejmoa1005372>.
- Rosas Sánchez K, Gutiérrez Zárate D, Cerón Díaz UW. Asociación y valor predictivo del poder mecánico con los días libres de ventilación mecánica. *Med Crit.* 2017;31:320-5.
- Moraes L, Silva PL, Thompson A, Santos CL, Santos RS, Fernandes MVS, et al. Impact of different tidal volume levels at low mechanical power on ventilator-induced lung injury in rats. *Front Physiol.* 2018;9:318.
- Jain SV, Kollisch-Singule M, Satalin J, Searles Q, Dombert L, Abdel-Razek O, et al. The role of high airway pressure and dynamic strain on ventilator-induced lung injury in a heterogeneous acute lung injury model. *Intensive Care Med Exp.* 2017;5:25.
- Zhang Z, Zheng B, Liu N, Ge H, Hong Y. Mechanical power normalized to predicted body weight as a predictor of mortality in patients with acute respiratory distress syndrome. *Intensive Care Med.* 2019;45:856-64.
- Estrada Álava CS, Morales Mayorga EG. Efecto del poder mecánico (PM) en la "mortalidad" y "días libres del ventilador mecánico" en pacientes adultos sin síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA) bajo ventilación mecánica invasiva (VMI) en la unidad de cuidados intensivos de 2 hospitales de la ciudad de Quito en 2019. Tesis; 2019. Disponible en: <https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/29181>.
- Parhar KKS, Zjadewicz K, Soo A, Sutton A, Zjadewicz M, Doig L, et al. Epidemiology, mechanical power, and 3-year outcomes in acute respiratory distress syndrome patients using standardized screening. An observational cohort study. *Ann Am Thorac Soc.* 2019;16:1263-72.
- Serpa Neto A, Deliberato RO, Johnson AEW, Bos LD, Amorim P, Pereira SM, et al. Mechanical power of ventilation is associated with mortality in critically ill patients: an analysis of patients in two observational cohorts. *Intensive Care Med.* 2018;44:1914-22.
- McGuinness G, Zhan C, Rosenberg N, Azour L, Wickstrom M, Mason DM, et al. High incidence of barotrauma in patients with COVID-19 infection on invasive mechanical ventilation. *Radiology.* 2020;297:E252-62.
- Marini JJ. Dissipation of energy during the respiratory cycle: conditional importance of ergotrauma to structural lung damage. *Curr Opin Crit Care.* 2018;24:16-22.
- Arnal JM, Saoli M, Garnerio A. Airway and transpulmonary driving pressures and mechanical powers selected by INTELLiVENT-ASV in passive, mechanically ventilated ICU patients. *Heart Lung.* 2020;49:427-34.
- Bein T, Wrigge H. Airway pressure release ventilation (APRV): do good things come to those who can wait? *J Thorac Dis.* 2018;10:667-9.
- Serpa-Neto A, Hemmes SN, Pelosi P, de Abreu MG, Schultz MJ; PROVE Network Investigators. Role of shear stress in ventilator-induced lung injury - Authors' reply. *Lancet Respir Med.* 2016;4:e43. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(16\)30161-8](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(16)30161-8).
- Tonna JE, Peltan ID, Brown SM, Grissom CK, Presson AP, Herrick JS, et al. Positive end-expiratory pressure and respiratory rate modify the association of mechanical power and driving pressure with mortality among patients with acute respiratory distress syndrome. *Crit Care Explor.* 2021;3:e0583.
- Rietveld, P. J., Snoep, J. W. M., Lamping, M., Van Der Velde, F., De Jonge, E., Van Westerloo, D. W., & Schoe, A. (2022). Mechanical Power Differs Between Pressure-Controlled Ventilation and Different Volume-Controlled Ventilation Modes. *Critical Care Explorations*, 4(8), e0741. <https://doi.org/10.1097/cce.0000000000000741>.

Presión de conducción en el síndrome de dificultad respiratoria aguda, estado actual del conocimiento: una revisión narrativa

Driving pressure in acute respiratory distress syndrome, current state of knowledge: a narrative review

Manuel S. Pérez-Díaz^{1*}  y Regina Solares-Zendejas² 

¹Servicio de Urgencias Adultos, Hospital Regional Licenciado Adolfo López Mateos, Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado; ²Departamento de Ciencias Biológicas y de Salud, Universidad Autónoma y Metropolitana. Ciudad de México, México

Resumen

La presión de conducción (ΔP) es crucial en la ventilación mecánica de los pacientes con síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA). La ΔP se define como la presión adicional necesaria para insuflar el volumen tidal (V_t) durante la inspiración, calculada dividiendo el V_t por la distensibilidad del sistema respiratorio. Al comparar la ventilación protectora, con ΔP controlada y V_t bajos, frente a enfoques convencionales, se observa una disminución en la mortalidad y en las complicaciones pulmonares. Mantener una ΔP por debajo de 20 cmH₂O optimiza los resultados clínicos. Las investigaciones han confirmado que una ΔP baja reduce significativamente la mortalidad hospitalaria y es un predictor robusto de estrés pulmonar y daño inducido por ventilador. Para medir la ΔP se recomienda una pausa inspiratoria breve durante la ventilación mecánica. En ventilación asistida es crucial evitar asincronías y esfuerzos inspiratorios activos, a veces utilizando sedantes o relajantes musculares. La ΔP proporciona una representación precisa de la deformación cíclica del parénquima pulmonar, siendo un mejor predictor de daño pulmonar que el V_t solo. Aunque no se ha evaluado como objetivo principal en la configuración ventilatoria, ajustar la ΔP podría mejorar la supervivencia en los pacientes con SDRA. Los estudios subrayan su relevancia en la gestión clínica. Futuros trabajos deben explorar intervenciones dirigidas a reducir la ΔP y evaluar su impacto en la gestión del SDRA a largo plazo, estableciendo la ΔP como un objetivo terapéutico primario en la ventilación mecánica.

Palabras clave: Presión de conducción. Ventilación mecánica. Distensibilidad pulmonar. Presión positiva al final de la espiración. Ventilación protectora.

Abstract

Driving pressure (ΔP) is crucial in mechanical ventilation for patients with acute respiratory distress syndrome (ARDS). The ΔP is defined as the additional pressure needed to inflate tidal volume (V_t) during inspiration, calculated by dividing V_t by respiratory system compliance (C_{rs}). When comparing protective ventilation, with controlled ΔP and low V_t , against conventional approaches, it is observed reduced mortality and pulmonary complications. Keeping ΔP below 20 cmH₂O optimizes clinical outcomes. Research confirmed that lower ΔP significantly reduces hospital mortality and predicts lung stress and ventilator-induced injury reliably. To measure ΔP , a brief inspiratory pause during mechanical ventilation is recommended. In assisted ventilation, it's crucial to avoid asynchronies and active inspiratory efforts, sometimes using sedatives or muscle

*Correspondencia:

Manuel S. Pérez-Díaz
E-mail: santiagoopd@outlook.com

Fecha de recepción: 29-02-2024

Fecha de aceptación: 11-03-2024

DOI: 10.24875/RECC.M24000003

Disponible en internet: 30-12-2024

REduCritic. 2024;3(2):68-76

www.reducritic.com

2938-1304 / © 2024 Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI). Publicado por Permanyer. Éste es un artículo open access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

relaxants. ΔP accurately reflects cyclic deformation of lung tissue, better predicting lung damage than V_t alone. While not a primary endpoint in ventilator settings, adjusting ΔP could enhance survival in ARDS. Studies highlight its relevance in clinical practice. Future research should explore interventions to lower ΔP and assess their long-term impact on ARDS management, establishing ΔP as a primary therapeutic target in mechanical ventilation.

Keywords: Driving pressure. Mechanical ventilation. Lung compliance. Positive end-expiratory pressure. Protective ventilation.

Introducción

La presión de conducción (ΔP) constituye un parámetro fundamental en la ventilación mecánica (VM) de los pacientes con síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA). Esta medida se define como la presión adicional necesaria para insuflar el volumen tidal (V_t) durante la inspiración, y se calcula dividiendo el V_t por la distensibilidad (*compliance*) del sistema respiratorio (C_{rs})¹.

Desde su introducción por Amato en estudios pioneros de finales de la década de 1980, la ΔP ha sido reconocida por su papel crítico en la optimización de las estrategias ventilatorias destinadas a reducir la mortalidad y las complicaciones pulmonares en pacientes con SDRA².

Los estudios iniciales de Amato et al.³ compararon estrategias de ventilación protectora que incluían niveles controlados de ΔP y volúmenes bajos de V_t con enfoques convencionales de VM. Estos estudios demostraron consistentemente una reducción significativa en la mortalidad, una menor incidencia de barotrauma y unas mayores tasas de desvinculación de la ventilación en los grupos tratados con ventilación protectora. Los resultados subrayaron la importancia de mantener la ΔP por debajo de ciertos umbrales, como 20 cmH₂O, para optimizar los resultados clínicos en pacientes con SDRA³.

A lo largo de las décadas siguientes, investigaciones adicionales han reforzado la asociación entre la ΔP y la supervivencia en pacientes con SDRA. Estudios como el LUNG-SAFE y análisis retrospectivos han corroborado que una ΔP más baja se asocia con una reducción significativa de la mortalidad hospitalaria. Además, la ΔP ha emergido como un predictor robusto de estrés pulmonar y daño inducido por el ventilador, proporcionando una guía valiosa para ajustar los parámetros ventilatorios en la práctica clínica^{4,5}.

A pesar de estos avances, persisten áreas de investigación para entender mejor cómo la manipulación específica de la ΔP puede mejorar aún más los resultados en pacientes con SDRA. Los estudios futuros

deberán explorar intervenciones dirigidas a la reducción de la ΔP , evaluar su impacto en el daño pulmonar inducido por el ventilador y validar su utilidad como objetivo terapéutico primario en la VM.

Importancia de la presión de conducción en la ventilación mecánica de pacientes con SDRA: evidencia y estrategias clínicas

La ΔP se refiere a la presión adicional, sobre la presión positiva al final de la espiración (PEEP), necesaria para insuflar el V_t . Esta presión resulta de las fuerzas elásticas que actúan durante la inspiración y se puede cuantificar mediante la relación entre el V_t y la C_{rs} . De este modo, la ΔP se calcula utilizando la ecuación $\Delta P = V_t / C_{rs}$ ^{1,2}.

En 1988, Amato consideró la ΔP en un estudio con 53 pacientes con SDRA, con el propósito de reducir las complicaciones y la mortalidad a los 28 días. Se compararon dos estrategias de VM: una protectora, con PEEP, volúmenes bajos y ΔP controlada, y otra convencional, con PEEP mínima y volúmenes mayores. Los resultados mostraron una menor mortalidad (38% vs. 71%), una mayor desvinculación de la VM (66% vs. 29%) y una menor incidencia de barotrauma (7% vs. 42%) en el grupo de ventilación protectora³.

En su estudio pionero, Amato destacó la importancia de la ΔP en la VM de pacientes con SDRA. Sus hallazgos sugieren que mantener la ΔP por debajo de 20 cmH₂O es seguro y efectivo para reducir la mortalidad y las complicaciones pulmonares. Estos resultados subrayan los beneficios de una estrategia de ventilación que minimice la ΔP para mejorar los resultados clínicos en los pacientes con SDRA³.

En un análisis realizado por el mismo Amato en 2015, se corroboró la importancia de la ΔP . En esta ocasión se incluyeron 336 pacientes con SDRA en fase inicial. Se comparó la VM protectora, con PEEP superior al punto de inflexión inferior, V_t menores de 6 ml/kg, $\Delta P < 20$ cmH₂O, hipercapnia permisiva y modos

ventilatorios limitados por presión, con la ventilación convencional. Los resultados a los 60 días mostraron una menor mortalidad (38% vs. 71%), mayores tasas de desvinculación de la ventilación (66% vs. 29%) y una incidencia de barotrauma menor (7% vs. 42%) en el grupo de ventilación protectora².

En el contexto de la VM en pacientes con SDRA, la ΔP ha emergido como una variable clave para la estratificación del riesgo. Los estudios han demostrado que las reducciones en ΔP , logradas mediante ajustes en la configuración del ventilador, están fuertemente correlacionadas con un aumento en la supervivencia de los pacientes^{2,4}.

En ensayos clínicos que incluyeron el V_t y la PEEP como variables independientes se observó que la ΔP era el indicador más robusto de supervivencia. Este hallazgo sugiere que las modificaciones en el V_t o la PEEP solo son beneficiosas si resultan en una disminución de la ΔP ³.

La ΔP es una representación accesible y fácil de calcular de la deformación cíclica del parénquima pulmonar. Se postula que esta deformación cíclica es un mejor predictor del daño pulmonar que el V_t , y que el tamaño funcional del pulmón durante la enfermedad se cuantifica de manera más precisa mediante la Crs que por el peso corporal predicho^{1,3}. En situaciones en que la Crs varía significativamente entre los pacientes, la deformación cíclica, el daño pulmonar inducido por el ventilador y la supervivencia se correlacionan más estrechamente con la ΔP que con el V_t ³.

Aunque este análisis no establece una causalidad directa, los estudios experimentales proporcionan un vínculo plausible entre la ΔP y el daño pulmonar inducido por el ventilador. A pesar de la relación matemática entre la ΔP , la Crs y el V_t , ninguna otra variable de ventilación ha ofrecido hasta la fecha información predictiva independiente sobre la supervivencia como la ΔP ^{2,3}.

La ΔP se destaca como una variable crítica en la VM de los pacientes con SDRA, proporcionando valiosa información predictiva sobre la supervivencia y orientando las mejores prácticas en el ajuste de la ventilación para reducir el riesgo de daño pulmonar y mejorar los resultados clínicos.

Durante la VM, y en ausencia de asincronías, la ΔP se puede calcular fácilmente en condiciones cuasies-táticas realizando una pausa inspiratoria de 0.2-0.3 segundos para medir la presión *plateau* (Pplat). En pacientes con SDRA, se considera que una ΔP segura es probablemente inferior a 15 cmH₂O².

En los pacientes que respiran espontáneamente bajo VM se puede realizar la misma medición administrando sedantes de acción corta, vigilando y evitando señales de disparo inverso. Si persiste el esfuerzo inspiratorio, se puede añadir un bolo de relajante muscular de acción corta. Luego se miden la Pplat y la PEEP total, y se calcula la Crs. Una vez realizada esta medición, y conociendo el V_t en cada respiración, se puede determinar rápidamente la ΔP en cada inspiración ($\Delta P = V_t / Crs$)¹.

Si se prefiere evitar el uso de sedantes, puede estimarse razonablemente la ΔP mediante algunos métodos simples y prácticos. Uno de ellos implica una oclusión al final de la inspiración durante la respiración espontánea (principalmente validada para la ventilación con soporte de presión) en aquellos pacientes que logran una relajación completa de los músculos respiratorios; en estos pacientes, se obtendrá una medición estable de la presión en la vía respiratoria^{1,5}.

Sin embargo, se cuenta con evidencia de que tanto la ΔP como la Crs están independientemente relacionadas con un aumento en la mortalidad durante la ventilación asistida por presión en los pacientes con SDRA. Un estudio retrospectivo que incluyó 154 pacientes con SDRA y VM controlada por presión, en comparación con la ventilación controlada por volumen, reveló que la Pplat durante la ventilación controlada por presión excedía la suma de la PEEP y la presión de soporte. Se observó que una menor Crs (40 vs. 51) y una mayor ΔP (11 vs. 10 cmH₂O) estaban asociadas de manera independiente con un mayor riesgo de muerte⁵.

La medición precisa de la Pplat puede presentar dificultades en pacientes con actividad de los músculos respiratorios y esfuerzos activos en la espiración. Este procedimiento implica una minuciosa observación de los trazados de la vía aérea. Aunque los trazados de Pplat inestables no son comunes, es esencial descartarlos para garantizar mediciones precisas^{6,7}.

Tras el estudio de Amato, varios investigadores han corroborado la relación entre la ΔP y la supervivencia en los pacientes con SDRA. Estos hallazgos subrayan la relevancia de incluir la ΔP , la Pplat y la Crs como variables fundamentales en la predicción de la mortalidad en este grupo de pacientes, lo que resalta la urgencia de validar estos resultados mediante estudios adicionales.

El estudio LUNG-SAFE⁴ incluyó 2377 pacientes con SDRA y VM. Analizó la relación entre la ΔP y la mortalidad hospitalaria en estos pacientes, y encontró que una ΔP más baja (< 14 cmH₂O) se asoció con una reducción del

Tabla 1. Parámetros ventilatorios a las 24 horas y mortalidad en estudios clínicos que han comparado estrategias protectoras frente a grupos control

Autor	n	Vt	Pplat	PEEP	ΔP	Mort	Vt	Pplat	PEEP	ΔP	Mort
Estrategia protectora							Grupo control				
Brochard et al. ¹⁷	108	7.1	25.7	10	15	46%	10.3	31.7	10	21	38%
Stewart et al. ¹⁸	120	7.2	22.3	8	13	48%	10.8	26.8	7	19	46%
Ranieri et al. ¹⁹	44	7.6	24.6	14	9	38%	11	31	6	24	58%
Brower et al. ²⁰	52	7.3	27	9	17	50%	10	30	8	21	46%
Amato et al. ²¹	53	6	31.8	16	15	38%	12	34	6	27	71%
ARDSnet ²²	861	6.1	25	9	15	31%	11	33	8	24	39%

Mort: mortalidad; ΔP : presión de conducción; PEEP: presión positiva al final de la espiración; Pplat: presión *plateau*; Vt: volumen tidal.

25% en el riesgo de mortalidad hospitalaria en los pacientes con SDRA moderado y del 33% en aquellos con SDRA grave. Además, una Pplat más baja ($< 25 \text{ cmH}_2\text{O}$) se asoció con una disminución del 31% en el riesgo de mortalidad hospitalaria en los pacientes con SDRA grave; paradójicamente, un aumento de la $\Delta P > 10 \text{ cmH}_2\text{O}$ incrementaba la mortalidad de manera lineal⁴.

Chiumello et al.⁸ realizaron un análisis retrospectivo de 150 pacientes con SDRA, profundamente sedados y paralizados. En estos pacientes se llevó a cabo una prueba de PEEP de 5 y $15 \text{ cmH}_2\text{O}$ manteniendo constantes el Vt y la frecuencia respiratoria. En ambos niveles de PEEP, el grupo con mayor ΔP presentó significativamente mayor estrés pulmonar, Crs y del pulmón, en comparación con el grupo con menor ΔP . De manera importante, la ΔP se relacionó significativamente con el estrés pulmonar (presión transpulmonar), y se encontró que una ΔP superior a $15 \text{ cmH}_2\text{O}$ y una ΔP transpulmonar superior a $11.7 \text{ cmH}_2\text{O}$ estaban asociadas con niveles peligrosos de estrés⁸.

En un estudio prospectivo se investigaron la incidencia, las etiologías, las características fisiológicas y clínicas, y la mortalidad del SDRA, centrándose en la ΔP como un predictor clave de mortalidad. De los 235 pacientes con SDRA, el 92% sobrevivieron más de 24 horas. Durante la primera semana, la ΔP demostró ser un parámetro fundamental para distinguir entre sobrevivientes y no sobrevivientes. La mortalidad hospitalaria se situó en el 58%. Los pacientes no sobrevivientes tuvieron una ΔP significativamente más elevada, con valores superiores a $15 \text{ cmH}_2\text{O}$. Los factores independientes asociados con la mortalidad incluyeron la ΔP al tercer día, lo que subraya su relevancia en el pronóstico del SDRA⁹.

Asimismo, en un estudio retrospectivo con 56 pacientes con SDRA se analizó la relación entre la ΔP , la

presión transpulmonar y la mortalidad a 28 días. Se ajustó la PEEP para mantener una presión transpulmonar positiva mediante manometría esofágica, comparado con un protocolo estándar. A las 24 horas, los sobrevivientes mostraron menores valores de ΔP y de presión transpulmonar, relacionados con una mejor elastancia y mayor PEEP. No hubo diferencias significativas en la ΔP a los 5 minutos, pero a las 24 horas el grupo de intervención presentó una menor ΔP . Estos hallazgos sugieren que ajustar la PEEP puede aumentar la elastancia y reducir la ΔP , lo que podría mejorar la supervivencia a 28 días¹⁰.

Un análisis secundario de los ensayos ACURASYS¹¹ y PROSEVA¹² incluyó 787 pacientes con SDRA ventilados con un Vt bajo, con el fin de identificar factores predictores de mortalidad a 90 días. Los resultados indicaron que la ΔP es un predictor significativo, presentando un promedio de $13.7 \pm 3.7 \text{ cmH}_2\text{O}$ los no sobrevivientes y de $12.8 \pm 3.7 \text{ cmH}_2\text{O}$ los sobrevivientes. Además, se encontró que la ΔP (*hazard ratio* [HR]: 1.05; $p = 0.005$), la Pplat (HR: 1.05; $p = 0.008$) y la Crs (HR: 0.985; $p = 0.029$) fueron factores significativos asociados con la mortalidad. En contraste, la PEEP y el Vt no mostraron asociación con la mortalidad^{13,14}.

A pesar de toda la evidencia que relaciona la ΔP con los resultados clínicos, hasta la fecha no se ha evaluado como objetivo principal durante la configuración ventilatoria en pacientes con SDRA. No obstante, algunos estudios han analizado el impacto individual de intervenciones específicas sobre la ΔP y han relacionado estos cambios con los resultados.

En un ensayo controlado con 200 pacientes con SDRA de moderado a grave se comparó la estrategia de PEEP moderada-alta con el protocolo ARDSnet (PEEP baja). El enfoque de PEEP moderada-alta mejoró significativamente la oxigenación y la ΔP a las

Tabla 2. Parámetros ventilatorios a las 24 horas y mortalidad en los estudios clínicos que han comparado presión positiva al final de la espiración alta frente a baja en pacientes con síndrome de dificultad respiratoria aguda

Autor	n	Vt	Pplat	PEEP	ΔP	Mort	Vt	Pplat	PEEP	ΔP	Mort
PEEP alta							PEEP baja				
ALVEOLI ²³	549	6	27	14	12	27%	6	24	9	14	24%
Mercat et al. ²⁴	767	6	27	15	11	35%	6	21	8	12	39%
Meade et al. ²⁵	983	6	30	15	14	36%	6	24	10	14	40%
Talmorc et al. ²⁶	61	7	28	17	11	17%	6	25	10	15	39%
Kacmarek et al. ²⁷	200	5	27	15	11	22%	6	25	11	13	27%

Mort: mortalidad; ΔP: presión de conducción; PEEP: presión positiva al final de la espiración; Pplat: presión *plateau*; Vt: volumen tidal.

Tabla 3. Resumen de los ensayos clínicos aleatorizados sobre el efecto de la presión de conducción en la mortalidad

Estudio	Población (n)	Estrategia de VM	Resultados	Comentarios
Amato et al. (1988) ²	53	VM protectora con PEEP, volúmenes bajos y ΔP controlada vs. VM convencional	Menor mortalidad (38% vs. 71%), mayor desvinculación de VM (66% vs. 29%), menor incidencia de barotrauma (7% vs. 42%)	Mantener ΔP < 20 cmH ₂ O es seguro y efectivo para reducir mortalidad y complicaciones pulmonares
Amato et al. (2015) ³	336	VM protectora con PEEP superior al punto de inflexión inferior, VT < 6 ml/kg, ΔP < 20 cmH ₂ O, hipercapnia permisiva	Menor mortalidad (38% vs. 71%), mayor desvinculación de VM (66% vs. 29%), menor incidencia de barotrauma (7% vs. 42%)	Refuerza la importancia de la ΔP en la reducción de mortalidad y complicaciones en SDRA
LUNG-SAFE (2016) ⁴	2377	VM en pacientes con SDRA	ΔP < 14 cmH ₂ O reduce el riesgo de mortalidad hospitalaria en SDRA moderado (25%) y grave (33%); Pplat < 25 cmH ₂ O reduce mortalidad en SDRA grave (31%)	ΔP y Pplat son predictores significativos de la mortalidad hospitalaria en SDRA
Bellani G. et al. (2019) ⁵	154	Comparación de VM controlada por presión vs. volumen	Pplat más alta en VM controlada por presión; menor CSR (40 vs. 51) y mayor ΔP (11 vs. 10 cmH ₂ O) asociadas con mayor mortalidad	Tanto la ΔP como la CSR están independientemente relacionadas con la mortalidad
Chiumello et al. (2014) ⁸	150	Prueba de PEEP de 5 y 15 cmH ₂ O con VT y FR constantes	Mayor ΔP asociada con mayor estrés pulmonar y menor CSR; ΔP > 15 cmH ₂ O y presión de conducción transpulmonar > 11.7 cmH ₂ O peligrosas	ΔP alta se asocia con estrés pulmonar significativo y riesgo aumentado de mortalidad
Estenssoro E. et al. (2016) ⁹	235	Evaluación de la ΔP durante la primera semana de VM	ΔP elevada (> 15 cmH ₂ O) en no sobrevivientes; ΔP al tercer día como factor independiente de mortalidad	ΔP es un parámetro clave para predecir la mortalidad en pacientes con SDRA
Baedorf K. et al. (2016) ¹⁰	56	Ajuste de PEEP para mantener presión transpulmonar positiva mediante manometría esofágica	Menor ΔP y presión transpulmonar en sobrevivientes a las 24 horas; mejor elastancia y mayor PEEP	Ajustar PEEP puede mejorar elastancia y reducir ΔP, mejorando la supervivencia a 28 días
Guérin C. et al (2016) ¹³	787	VT bajo en pacientes con SDRA	ΔP significativa como predictor de mortalidad (13.7 ± 3.7 cmH ₂ O en no sobrevivientes vs. 12.8 ± 3.7 cmH ₂ O en sobrevivientes); Pplat y CSR también significativos	ΔP, Pplat y CSR son factores significativos asociados con la mortalidad, mientras que PEEP y VT no muestran asociación

Crs: distensibilidad del sistema respiratorio; ΔP: presión de conducción; PEEP: presión positiva al final de la espiración; Pplat: presión *plateau*; SDRA: síndrome de dificultad respiratoria aguda; VM: ventilación mecánica; Vt: volumen tidal.

24, 48 y 72 horas, sin diferencias en la mortalidad a 60 días, la mortalidad en la unidad de cuidados intensivos ni los días libres de ventilación¹⁵.

En un metaanálisis de 17 ensayos controlados aleatorizados, con un total de 2250 pacientes, se investigó la asociación entre el Vt, la PEEP y la ΔP durante la ventilación intraoperatoria con el desarrollo de complicaciones pulmonares posoperatorias. Los resultados mostraron que la ΔP estaba significativamente asociada con complicaciones pulmonares posoperatorias, mientras que el Vt y la PEEP no mostraron una asociación significativa¹⁶.

Un aumento en la PEEP que incrementaba la ΔP se asoció con más complicaciones pulmonares. Se sugiere que la ΔP es un mediador significativo de las complicaciones pulmonares, pero se necesita un ensayo controlado aleatorizado para confirmar estos hallazgos.

En el metaanálisis de Amato et al.² se analizaron las modificaciones en la ΔP resultantes de cambios específicos en el Vt o en la PEEP aplicados después de la aleatorización. Los resultados mostraron que los cambios que lograron disminuir la ΔP se asociaron con una mayor supervivencia de los pacientes.

La **tabla 1** ofrece un resumen comparativo de estudios clínicos que han evaluado los efectos de diferentes estrategias ventilatorias en pacientes SDRA. Se analizan los parámetros ventilatorios a las 24 horas y la mortalidad en los estudios que comparan estrategias protectoras, caracterizadas por limitar el Vt y controlar la ΔP , frente a estrategias convencionales. Se destacan mediciones como el Vt, la Pplat, la PEEP y la ΔP , y las tasas de mortalidad en cada grupo¹⁷⁻²².

La **tabla 2** presenta un análisis comparativo de estudios clínicos que han investigado los efectos de diferentes niveles de PEEP en pacientes con SDRA. Se examinan los parámetros ventilatorios medidos a las 24 horas, incluyendo el Vt, la Pplat, la PEEP y la ΔP , junto con las tasas de mortalidad en cada grupo. Este análisis destaca las variaciones en el manejo ventilatorio y su impacto potencial en los resultados clínicos de los pacientes con SDRA, proporcionando información crucial para la optimización de las estrategias ventilatorias en este contexto clínico²³⁻²⁷.

Ventilación mecánica guiada por la presión de conducción en la práctica clínica

El tamaño funcional del pulmón se refiere al volumen de pulmón aireado disponible para la ventilación, derivado del concepto de *baby lung*. Los pacientes con

SDRA muestran, en los estudios de tomografía computarizada, que tienen la misma cantidad de tejido pulmonar normalmente aireado que un niño de 5-6 años. La Crs está linealmente relacionada con las dimensiones del *baby lung*²⁸.

De acuerdo con la explicación proporcionada por Gattinoni y Pesenti¹⁷, el pulmón afectado por SDRA no se caracteriza por su rigidez, sino por su reducido tamaño y una elasticidad intrínseca casi normal. El concepto de *baby lung* enfatiza que la relación entre el Vt y el tamaño del pulmón es más relevante que la relación con el peso corporal. A medida que el *baby lung* disminuye de tamaño, aumenta el riesgo de provocar lesiones pulmonares inducidas por la ventilación²⁹.

Del mismo modo que ocurre en el SDRA, el tamaño funcional del pulmón podría ser reducido en pacientes con patologías pulmonares tales como atelectasia, consolidación, bullas, efusión o fibrosis. Superar el volumen de ventilación adecuado para este tamaño funcional podría aumentar la ΔP del sistema respiratorio²⁸.

La ΔP debería ser mínima cuando la PEEP mantiene los alvéolos en la capacidad residual funcional al final de la espiración, y el Vt expande los pulmones dentro de su tamaño funcional³⁰.

En esta misma línea, la ΔP puede orientar la ventilación personalizada según el tamaño funcional del pulmón de cada paciente. Desde la atención a pie de la cama resulta más práctico utilizar la ΔP como guía en lugar de la distensibilidad estática (Cstat). Esta última implica la interacción de las presiones y el Vt [$Vt / (Pplat - PEEP)$], siendo más compleja de calcular y potencialmente más susceptible a cambios erráticos durante su abordaje, en contraste con la ΔP , que se calcula mediante dos presiones simples ($Pplat - PEEP$)³¹.

Actualmente no existen técnicas establecidas para reducir la ΔP . Esta presión depende de la PEEP y del Vt³¹. Por lo tanto, ajustar la PEEP y el Vt podría tener el potencial de reducir la ΔP . Existen pocos estudios sobre el ajuste de la PEEP basado en la ΔP , y aún no hay estudios significativos sobre la titulación del Vt basada en la ΔP .

En un estudio realizado a gran escala por la ARDSnet se comparó el uso de PEEP alta (13-15 cmH₂O) frente a PEEP baja (8 cmH₂O) en pacientes con SDRA, y no se encontraron diferencias significativas en términos de mortalidad²³. En un estudio posterior, con 767 pacientes con SDRA, se comparó una estrategia de PEEP moderada (5-9 cmH₂O, PEEP promedio 7 cmH₂O)

con una estrategia de PEEP más alta (ajustada para una Pplat de 28-30 cmH₂O, PEEP promedio 15 cmH₂O) y de nuevo no se observaron diferencias significativas en la tasa de mortalidad a 28 días²⁴.

La mayoría de los estudios sobre titulación de la PEEP han sido a pequeña escala y utilizando la Cstat como método de titulación. Sin embargo, ajustar la PEEP utilizando la Cstat también redujo la ΔP .

En un estudio con pacientes sometidos a cirugía abdominal se ajustó la PEEP para lograr la mayor Cstat en el grupo experimental de PEEP individualizada, mientras que el grupo control recibió PEEP fija de 5 cmH₂O. La PEEP individualizada redujo la ΔP en un 28% en comparación con la PEEP fija. La ΔP media fue de 5.6 ± 1 cmH₂O para el grupo de PEEP individualizada y de 7.4 ± 1 cmH₂O para el grupo de PEEP fija. La PEEP promedio fue de 8 cmH₂O, con un rango de 6 a 14 cmH₂O, en el grupo de PEEP individualizada³².

En un estudio realizado por Park et al.³³ se comparó la ventilación protectora convencional con la ventilación guiada por ΔP . En este enfoque, la PEEP se ajustó para alcanzar la ΔP más baja durante la ventilación, mientras que el grupo control mantuvo una PEEP fija de 5 cmH₂O. La incidencia de complicaciones pulmonares fue del 12.2% con la ventilación convencional y del 5.5% con la ventilación guiada por ΔP . La diferencia media en la ΔP fue mínima, solo 1 cmH₂O. El estudio sugiere que la aplicación de PEEP individualizada y la reducción en los pacientes con alta ΔP fueron factores clave para los mejores resultados observados en la ventilación guiada por ΔP ³³.

La otra alternativa, la reducción del Vt, disminuiría la ΔP , pero únicamente hasta el punto en que esa reducción no provoque colapso alveolar. En algunos casos se observó que un aumento del Vt se asoció con una disminución de la ΔP y complicaciones pulmonares. Esto podría deberse a una reducción de la atelectasia, en especial cuando el nivel de PEEP no es adecuado³⁴.

Sin embargo, según las imágenes tridimensionales del pulmón, el cálculo del tamaño pulmonar basado en el peso corporal predicho del paciente mostró con frecuencia discrepancias con el tamaño real del pulmón. La correlación entre la capacidad pulmonar real y el peso predicho basado en la altura del paciente no fue fuerte ($R = 0.58-0.65$), y resultó especialmente pobre en los pacientes con baja Crs³⁵.

En un estudio con 31 pacientes diagnosticados con SDRA y $\Delta P > 13$ cmH₂O se comparó una estrategia de ventilación limitada por presión con el protocolo

convencional ARDSNet. En el grupo de intervención se ajustó el Vt para alcanzar una ΔP objetivo ≤ 10 cmH₂O, mientras que en el grupo control se mantuvo un Vt estándar de 6 ml/kg, reducible a 4 ml/kg si la Pplat superaba los 30 cmH₂O³⁴. La estrategia limitada por presión redujo significativamente la ΔP en 4.6 cmH₂O y el Vt en 1.3 ml/kg durante los primeros 3 días, en comparación con el grupo control. No se observaron diferencias significativas en la incidencia de acidosis grave ni en otros resultados clínicos secundarios entre ambos grupos. Estos resultados sugieren que la estrategia de ventilación limitada por presión podría mejorar la gestión ventilatoria en los pacientes con SDRA, aunque se requieren más estudios para evaluar su impacto a largo plazo³⁴.

La [tabla 3](#) resume los hallazgos clave de los ensayos clínicos aleatorizados que investigaron el efecto de la diferencia de la ΔP en la mortalidad y otras métricas relevantes en pacientes con SDRA. Estos estudios han explorado diferentes estrategias de VM, variando desde Vt bajos y ΔP controlada hasta ajustes de PEEP y Pplat, y han encontrado asociaciones significativas entre una ΔP elevada y un mayor estrés pulmonar, así como una mortalidad incrementada. Los resultados refuerzan la importancia crítica de mantener la ΔP por debajo de ciertos umbrales para mejorar los desenlaces en los pacientes con SDRA, destacando su relevancia como predictor clave de complicaciones y de mortalidad en este contexto clínico^{2-5,8-10,13}.

Discusión

La ΔP ha emergido como un parámetro crítico en la VM de los pacientes con SDRA, y se dispone de evidencia sólida que respalda su papel en la optimización de las estrategias ventilatorias para mejorar los resultados clínicos. Inicialmente introducida por Amato en la década de 1980, la ΔP se define como la presión adicional necesaria para insuflar Vt durante la inspiración.

Los estudios pioneros de Amato compararon estrategias de ventilación protectora, que incluían el control de la ΔP y Vt bajos, con enfoques convencionales. Demostraron consistentemente una menor mortalidad, una menor incidencia de barotrauma y una mayor desvinculación de la ventilación en los grupos tratados con ventilación protectora. Desde entonces, numerosos estudios han confirmado que mantener la ΔP por debajo de ciertos umbrales, como 20 cmH₂O, es fundamental para reducir el daño pulmonar y mejorar la supervivencia en los pacientes con SDRA.

Las investigaciones adicionales han reforzado la asociación entre una ΔP más baja y una menor mortalidad hospitalaria, destacando su utilidad como predictor de estrés pulmonar y de daño inducido por el ventilador. A pesar de estos avances, persisten áreas de investigación para entender mejor cómo la manipulación específica de la ΔP puede optimizar aún más los resultados en los pacientes con SDRA.

En la práctica clínica, calcular y controlar la ΔP es crucial para ajustar los parámetros ventilatorios de manera individualizada, asegurando una ventilación óptima y minimizando el riesgo de complicaciones pulmonares. Los métodos para medir la ΔP incluyen la pausa inspiratoria durante la VM controlada y otras técnicas validadas para la ventilación con soporte de presión en pacientes que respiran espontáneamente.

Aunque la evidencia respalda el uso de la ΔP como guía en la VM de los pacientes con SDRA, es necesario continuar investigando para establecer su implementación como objetivo principal en la configuración ventilatoria. Futuros estudios deberán explorar intervenciones dirigidas específicamente a reducir la ΔP y evaluar su impacto a largo plazo en la gestión del SDRA.

Conclusión

La ΔP se posiciona como un parámetro crítico en la VM de los pacientes con SDRA, no solo como un indicador de la carga mecánica sobre el pulmón, sino también como una herramienta predictiva y terapéutica para mejorar los resultados clínicos. Desde su introducción por Amato en la década de 1980, la optimización de la ΔP mediante estrategias de ventilación protectora ha demostrado consistentemente reducir la mortalidad, minimizar el riesgo de barotrauma y promover una desvinculación más rápida de la VM en los pacientes con SDRA.

Los estudios pioneros de Amato establecieron que mantener la ΔP por debajo de ciertos umbrales, típicamente 15 cmH₂O, es seguro y eficaz para mitigar el daño pulmonar inducido por la ventilación y mejorar la supervivencia. Investigaciones posteriores, como el estudio LUNG-SAFE y algunos análisis retrospectivos, han corroborado estos hallazgos al identificar una relación directa entre una ΔP más baja y una menor mortalidad hospitalaria en los pacientes con SDRA.

A pesar de estos avances, persisten áreas de investigación para entender mejor cómo la manipulación

específica de ΔP puede optimizar aún más los resultados en el SDRA. Futuros estudios deberán explorar intervenciones dirigidas a reducir la ΔP de manera efectiva y evaluar su impacto en el daño pulmonar y la supervivencia a largo plazo.

En la práctica clínica, el monitoreo y el ajuste de la ΔP se han convertido en una práctica estándar para optimizar la VM en los pacientes con SDRA, utilizando parámetros como la Pplat y la PEEP para calcularla. Mantener la ΔP dentro de rangos seguros no solo puede prevenir complicaciones, sino también mejorar significativamente el pronóstico del paciente.

En conclusión, la ΔP , además de un parámetro de medición, es también un objetivo terapéutico en la VM de los pacientes con SDRA, destacando su importancia en la gestión clínica para mejorar la supervivencia y reducir la morbilidad asociada a esta compleja condición pulmonar.

Financiamiento

Los autores declaran que este trabajo se realizó con recursos propios.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Consideraciones éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes. Además, los autores han reconocido y seguido las recomendaciones según las guías SAGER dependiendo del tipo y naturaleza del estudio.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. Los autores han obtenido la aprobación del Comité de Ética para el análisis y publicación de datos clínicos obtenidos de forma rutinaria. El consentimiento informado de los pacientes no fue requerido por tratarse de un estudio observacional retrospectivo.

Uso de inteligencia artificial para generar textos. Los autores declaran que no han utilizado ningún tipo de inteligencia artificial generativa en la redacción de este manuscrito ni para la creación de figuras, gráficos, tablas o sus correspondientes pies o leyendas.

Bibliografia

- Roca O, Goligher EC, Amato MBP. Driving pressure: applying the concept at the bedside. *Intensive Care Med.* 2023;49(8):991-5.
- Amato MBP, Meade MO, Slutsky AS, Brochard L, Costa ELV, Schoenfeld DA, et al. Driving pressure and survival in the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 2015;372(8):747-55.
- Amato MB, Barbas CS, Medeiros DM, Magaldi RB, Schettino GP, Lorenzi-Filho G, et al. Effect of a protective-ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 1998;338(6):347-54.
- Bellani G, Laffey JG, Pham T, Fan E, LUNG SAFE Investigators and the ESICM Trials Group. The LUNG SAFE study: a presentation of the prevalence of ARDS according to the Berlin Definition. *Crit Care.* 2016;20(1):268.
- Bellani G, Grassi A, Sosio S, Gatti S, Kavanagh BP, Pesenti A, et al. Driving pressure is associated with outcome during assisted ventilation in acute respiratory distress syndrome. *Anesthesiology.* 2019;131(3):594-604.
- Bellani G, Grassi A, Sosio S, Foti G. Plateau and driving pressure in the presence of spontaneous breathing. *Intensive Care Med* [Internet]. 2019;45(1):97-8. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00134-018-5311-9>.
- Bianchi I, Grassi A, Pham T, Telias I, Tegaglia Droghi M, Vieira F, et al. Reliability of plateau pressure during patient-triggered assisted ventilation. Analysis of a multicentre database. *J Crit Care.* 2021;68:96-103.
- Chiumello D, Carlesso E, Brioni M, Cressoni M. Airway driving pressure and lung stress in ARDS patients. *Crit Care.* 2016;20:276.
- Estenssoro E, Dubin A, Laffaire E, Canales H, Sáenz G, Moseinco M, et al. Incidence, clinical course, and outcome in 217 patients with acute respiratory distress syndrome. *Crit Care Med.* 2002;30(11):2450-6.
- Baedorf Kassis E, Loring SH, Talmor D. Mortality and pulmonary mechanics in relation to respiratory system and transpulmonary driving pressures in ARDS. *Intensive Care Med.* 2016;42(8):1206-13.
- Papazian L, Forel J-M, Gacouin A, Penot-Ragon C, Perrin G, Loundou A, et al. Neuromuscular blockers in early acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 2010;363(12):1107-16.
- Guérin C, Reignier J, Richard J-C, Beuret P, Gacouin A, Boulain T, et al. Prone positioning in severe acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 2013;368(23):2159-68.
- Guérin C, on behalf of the investigators of the Acurasys and Proseva trials, Papazian L, Reignier J, Ayzac L, Loundou A, et al. Effect of driving pressure on mortality in ARDS patients during lung protective mechanical ventilation in two randomized controlled trials. *Crit Care.* 2016;20(1).
- Louis B, Cour M, Argaud L, Guérin C. The impact of PEEP on ventilation distribution in ARDS. *Respir Care.* 2024;69(10):1231-8.
- Villar J, Martín-Rodríguez C, Domínguez-Berrot AM, Fernández L, Ferrando C, Soler JA, et al. A quantile analysis of plateau and driving pressures: Effects on mortality in patients with acute respiratory distress syndrome receiving lung-protective ventilation. *Crit Care Med.* 2017;45(5):843-50.
- Serafini SC, van Meenen DMP, Pisani L, Neto AS, Ball L, de Abreu MG, et al. Different ventilation intensities among various categories of patients ventilated for reasons other than ARDS--A pooled analysis of 4 observational studies. *J Crit Care.* 2024;81:154531.
- Brochard L, Roudot-Thoraval F, Roupie E, Delclaux C, Chastre J, Fernandez-Mondéjar E, et al. Tidal volume reduction for prevention of ventilator-induced lung injury in acute respiratory distress syndrome. *Am J Respir Crit Care Med.* 1998;158(6):1831-8.
- Stewart TE, Meade MO, Cook DJ, Granton JT, Hodder RV, Lapinsky SE, et al. Evaluation of a ventilation strategy to prevent barotrauma in patients at high risk for acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 1998;338(6):355-61.
- Ranieri VM, Suter PM, Tortorella C, De Tullio R, Dayer JM, Brienza A, et al. Effect of mechanical ventilation on inflammatory mediators in patients with acute respiratory distress syndrome: A randomized controlled trial. *JAMA.* 1999;282(1):54.
- Brower RG, Lanken PN, MacIntyre N, Matthay MA, Morris A, Ancukiewicz M, et al. Higher versus lower positive end-expiratory pressures in patients with the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J.* 2004;351(4):327-36.
- Amato MBP, Barbas CSV, Medeiros DM, Magaldi RB, Schettino GP, Lorenzi-Filho G, et al. Effect of a protective-ventilation strategy on mortality in the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 1998; 338(6):347-54.
- Acute Respiratory Distress Syndrome Network, Brower RG, Matthay MA, Morris A, Schoenfeld D, Thompson BT, et al. Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome. *N Engl J Med.* 2000;342(18):1301-8.
- Goligher EC, Costa ELV, Yarnell CJ, Brochard LJ, Stewart TE, Tomlinson G, et al. Effect of lowering Vt on mortality in acute respiratory distress syndrome varies with respiratory system elastance. *Am J Respir Crit Care Med.* 2021;203(11):1378-85.
- Mercat A, Richard J-CM, Vieille B, Jaber S, Osman D, Diehl J-L, et al. Positive end-expiratory pressure setting in adults with acute lung injury and acute respiratory distress syndrome: a randomized controlled trial. *JAMA.* 2008;299(6):646-55.
- Meade MO, Cook DJ, Guyatt GH, Slutsky AS, Arabi YM, Cooper DJ, et al. Ventilation strategy using low tidal volumes, recruitment maneuvers, and high positive end-expiratory pressure for acute lung injury and acute respiratory distress syndrome: a randomized controlled trial. *JAMA.* 2008;299(6):637-45.
- Talmor D, Sarge T, Malhotra A, O'Donnell CR, Ritz R, Lisbon A, et al. Mechanical ventilation guided by esophageal pressure in acute lung injury. *N Engl J Med.* 2008;359(20):2095-104.
- Kacmarek RM, Villar J, Sulemanji D, Montiel R, Ferrando C, Blanco J, et al. Open lung approach for the Acute Respiratory Distress Syndrome: A pilot, randomized controlled trial. *Crit Care Med.* 2016;44(1):32-42.
- Neto AS, Hemmes SNT, Barbas CSV, Beiderlinden M, Fernandez-Bustamante A, Futier E, et al. Association between driving pressure and development of postoperative pulmonary complications in patients undergoing mechanical ventilation for general anaesthesia: a meta-analysis of individual patient data. *Lancet Respir Med.* 2016;4(4):272-80.
- Gattinoni L, Marini JJ, Pesenti A, Quintel M, Mancebo J, Brochard L. The "baby lung" became an adult. *Intensive Care Med.* 2016;42(5):663-73.
- Silva PL, Rocco PRM. The basics of respiratory mechanics: ventilator-derived parameters. *Ann Transl Med.* 2018;6(19):376.
- Ahn HJ, Park M, Kim JA, Yang M, Yoon S, Kim BR, et al. Driving pressure guided ventilation. *Korean J Anesthesiol.* 2020;73(3):194-204.
- Ferrando C, Suarez-Sipmann F, Tusman G, León I, Romero E, Gracia E, et al. Open lung approach versus standard protective strategies: Effects on driving pressure and ventilatory efficiency during anesthesia - A pilot, randomized controlled trial. *PLoS One.* 2017;12(5):e0177399.
- Park M, Ahn HJ, Kim JA, Yang M, Heo BY, Choi JW, et al. Driving pressure during thoracic surgery: A randomized clinical trial. *Anesthesiology.* 2019;130(3):385-93.
- Siuba MT, Bulgarelli L, Duggal A, Cavalcanti AB, Zampieri FG, Rey DA, et al. Differential effect of positive end-expiratory pressure strategies in Patients With ARDS: A Bayesian analysis of clinical subphenotypes. *Chest.* 2024;166(4):754-64.
- Hoftman N, Eikermann E, Shin J, Buckley J, Navab K, Abtin F, et al. Utilizing forced vital capacity to predict low lung compliance and select intraoperative tidal volume during thoracic surgery. *Anesth Analg.* 2017;125(6):1922-30.

Equity in critical care: a review of artificial intelligence driven solutions

Equidad en cuidados críticos: una revisión de las soluciones impulsadas por la inteligencia artificial

Venkata Buddhavarapu^{1*}, Harpreet Singh-Grewal², Gagandeep Dhillon³, and Rahul Kashyap⁴

¹Attending Hospitalist, Banner Baywood Medical Center, Banner Health, Mesa, Arizona; ²Attending Radiologist, Ascension Sacred Heart Hospital, Pensacola, Florida; ³Assistant Medical Director, UM Baltimore Washington Medical Center, Glen Burnie, Maryland; ⁴Department of Research, WellSpan Health, York, Pennsylvania. USA

Abstract

The critical care unit provides complex care to patients with the highest risk of debility and death. While providers attempt to treat these patients in an objective and evidence-based manner, evidence suggests that patients of certain ethnicities, socio-economic backgrounds, age, and gender have worse outcomes in the ICU. While scoring systems have been employed to improve objectivity in this area, consistent application and generalizability remain a concern. One way to bridge this gap is to employ Machine Learning (ML) algorithms using patient data to obtain an objective assessment of the patient's condition to better make clinical care decisions. Prognostication tools such as ELDER-ICU use ML algorithms in conjunction with traditional scoring tools to control against bias. ML based protocols have also been employed in Unfractionated heparin dosing and other nomograms, developing higher quality calculations for eGFR and utilize heart rates and dermal temperature scores to model the effectiveness of pain control methods in the critical care unit. With the development of Chatbots and other interactive text-based applications, clinicians are also utilizing AI for informed consent and patient education in the critical care setting. With continuous advancements in the field of AI, each individual patient can have a tailor-made plan that incorporates real-time data into multiple ML protocols to provide the best outcomes. Care to be taken to ensure that these algorithms are designed in a controlled way that eliminates bias/disparities at the developmental stage.

Keywords: Artificial intelligence. Machine learning. Critical care. Healthcare disparities.

Resumen

La unidad de cuidados críticos brinda atención compleja a pacientes con el mayor riesgo de discapacidad y muerte. Si bien los proveedores intentan tratar a estos pacientes de manera objetiva y basada en evidencia, hay evidencia que sugiere que pacientes de ciertas etnias, antecedentes socioeconómicos, edad y género tienen peores resultados en la UCI. Aunque se han empleado sistemas de puntuación para mejorar la objetividad en esta área, la aplicación consistente y la generalización siguen siendo motivo de preocupación. Una forma de cerrar esta brecha es utilizar algoritmos de Aprendizaje Automático (ML) con datos de pacientes para obtener una evaluación objetiva de la condición del paciente y así tomar mejores decisiones en la atención clínica. Herramientas de pronóstico como ELDER-ICU utilizan algoritmos de ML junto con herramientas de puntuación tradicionales para controlar sesgos. También se han empleado protocolos basados en ML en la dosificación de heparina no fraccionada y otros nomogramas, desarrollando cálculos de mayor calidad para el eGFR y

*Correspondence:

Venkata Buddhavarapu

E-mail: venkatabuddhavarapu@gmail.com

Date of reception: 07-05-2024

Date of acceptance: 09-10-2024

DOI: 10.24875/RECC.24000010

Disponible en internet: 30-12-2024

REduCritic. 2024;3(2):77-84

www.reducritic.com

2938-1304 / © 2024 Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI). Publicado por Permanyer. Éste es un artículo open access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

utilizando frecuencias cardíacas y puntuaciones de temperatura dérmica para modelar la efectividad de los métodos de control del dolor en la unidad de cuidados críticos. Con el desarrollo de chatbots y otras aplicaciones interactivas basadas en texto, los clínicos también están utilizando IA para el consentimiento informado y la educación del paciente en el entorno de cuidados críticos. Con los avances continuos en el campo de la IA, cada paciente puede tener un plan personalizado que incorpore datos en tiempo real en múltiples protocolos de ML para proporcionar los mejores resultados. Se debe tener cuidado para garantizar que estos algoritmos se diseñen de manera controlada que elimine sesgos/desigualdades en la etapa de desarrollo.

Palabras clave: Inteligencia artificial. Aprendizaje automático. Cuidados críticos. Desigualdades en la atención médica.

Introduction

The COVID-19 pandemic brought to light disparities in health care delivery for patients in the critical care setting^{1,2}. Numerous studies have shown racial/ethnicity and gender related biases in the intensive care unit that has led to worse outcomes^{3,4}. Some of these biases are thought to be related to systemic issues rather than personal biases from providers but the final outcomes appear to be the same. With advances being made in Electronic Health care systems and Artificial Intelligence, there is hope that these concerns can be addressed effectively. In this narrative review, we demonstrate disparities in care received in the critical care setting based on race, gender, age, and other factors and highlight the potential of Artificial Intelligence as a solution.

Disparities related to race/ethnicity and socioeconomic status were thought to be a fundamental concern for critical care access but were not well studied prior to the COVID-19 pandemic. The dramatic need for critical care access during the pandemic brought these issues to light. One example of this is a large-scale cross-sectional study performed by Burdick et al. to study if access to an Intensive care unit (ICU) level of care was affected by the ethnicity of the patient⁵. They determined that there was a significant decrease in access to ICU level care for American Indian, Alaskan Native and Pacific Islander patients across a variety of states and locations even after controlling for accessibility and resources⁵. This finding is further exacerbated by evidence from Kanter et al. showing that on average, lower income communities have poorer access to ICU level care than wealthier communities, be it in a rural or urban setting⁶. To determine if these disparities existed in the critical care setting, Griffie et al. performed a multicenter cohort study evaluating the differences in treatment of COVID-19 across a variety of factors². They found a significant difference

in length of stay, in-hospital mortality, and severity in patients for indigenous patient groups². In this study, American Indian and Alaskan Native patients did significantly poorly when compared to white patients with higher rates of mechanical ventilation (89% vs. 72%), renal failure (42% vs 26%), and death (OR of 2.43)². Of note, American Indian and Alaskan Native patients had a higher APACHE II score which was able to predict their poor outcomes². Database studies have also shown inherent disparities based on race when assigning critical interventions such as Mechanical ventilation and Pressors⁷. Even the pediatric population experienced disparities with access to critical care related resources. Ravi et al. found a significant decrease in quality of care received by black and Hispanic infants in Neonatal intensive care units (NICUs)⁸. They also noted an increase in healthcare associated infections (HAIs) as a result of poorer education in these groups⁸. Outside the United States, studies from the Brazil⁹ and Sweden¹⁰ were also able to show differences in ICU mortality and admission rates based on ethnicity, with minority ethnicities doing much worse.

It is important to note the complex nature between race and socioeconomic status when evaluating healthcare disparities. Particularly in the United States, those of a certain race are also part of a lower socioeconomic status which can lead to confounding of the results¹¹. Large databases are required to further ascertain the direct effect of either of these variables which the aforementioned studies do account for. The challenge of studies evaluating healthcare disparities is to control for innate clinical differences while evaluating the differences arising from factors such as income, education, race and other variables that affect healthcare decisions that are made by clinicians¹².

Gender based disparities have also been an area of focus in critical care. Multiple studies have suggested bias in the appropriate care of women, either due to lower admission rate or lack of timely care^{3,13}. Modra et al.³

suggested that women were less likely to receive mechanical ventilation (OR = 0.83) or Renal Replacement therapy (OR = 0.79). Arslani et al. evaluated the rate of ICU admissions and mortality for acute myocardial infarction (AMI) across genders using the Switzerland ICU registry and found a significantly higher rate of mortality for young women as compared to men (OR = 1.2)¹⁴. In this study, men were more likely to be offered reperfusion therapy (55.5% vs 48.5%, $p < 0.001$), mechanical ventilation (11.9% vs 8.3%, $p < 0.001$), and vasopressor support (22.5% vs 19.6%, $p = 0.003$) as compared to women¹⁴. Merdji et al. further confirmed this finding across a variety of illnesses that would warrant ICU admission¹⁵. They showed that women were less likely to be admitted to the ICU for sepsis and septic shock; less likely to cardiac interventions such as coronary reperfusion and Coronary bypass surgery; less likely to receive low-volume ventilation in cases of Acute respiratory distress syndrome; more likely to have a delay in receiving renal replacement therapy; and more likely to be underdiagnosed with ICU delirium¹⁵. In the context of gender, there are no studies conducted on disparities in the LGBTQ+ community. While there is evidence to suggest that this community does face bias in the healthcare setting¹⁶, further studies are needed.

Another area of potential bias is Ageism, the idea of rationing care based on the age of the patient. The idea behind this stems from studies that demonstrated a decrease in likelihood of aggressive treatments for older patients with severe coronary disease¹⁷, acute myocardial infarction¹⁸ and intracranial bleeds¹⁹. A large population study by Hubbard et al.²⁰ done in Wales, United Kingdom, did not perceive any bias against elderly patients in terms of ICU admissions. Many studies suggest however that traditional criteria used for ICU admission and intensity of treatment offered varies considerably from one unit to the next which often leads to bias in the care of these patients^{21,22}.

Material and methods

We describe a narrative review of various ways AI can be used to address disparities in critical care.

Results

The growing field of Artificial Intelligence has the potential to mitigate many of the disparity problems inherent to critical care management. These systems are designed to use raw data to produce accurate results and can be programmed to control for differences in age,

sex, ethnicity, and even socioeconomic status. Table 1 provides some specific examples of how AI can improve inequalities in critical care access and management.

Utility of AI in reducing disparities related to ICU admission

The most common method of controlling against bias in the critical care setting has been the implementation of scoring systems that help predict severity and mortality in a patient. The most commonly used systems are Acute Physiology and Chronic Health Evaluation IV (APACHE IV)²³, Simplified Acute Physiology Score (SAPS) II²⁴ and Sequential Organ Failure (SOFA)²⁵. These scoring systems use objective information such as blood gas data, renal function, Glasgow coma scale and blood pressure data to predict risk of clinical deterioration. Improvement in these assessments can also influence the resources used and determine when patients can leave the ICU once stable. The challenge with these scoring tools is promptly obtaining accurate objective data to make real time decisions and a lack of continuous data points to track changes. Additionally, these scoring tools can predict overall mortality as a snapshot but do not provide any meaningful data over an extended period. The scoring tools are also not well calibrated across global populations²⁶ and are more likely to have worse scores in patients on Black and Hispanic ethnicity²⁷.

AI based tools can be an asset in making these complex decisions in an objective way thereby avoiding bias. Tang et al. developed a risk stratification tool using data obtained from APACHE IV scores, SAPS II scores and other biomarkers and using a deep learning model to determine survival outcomes²⁸. Their algorithm was limited by insufficient computing power to add all the variable for their data but was able to show survival probabilities using objective data²⁸. The model is still in the development stage and was mainly designed with retrospective data. Further studies are planned to evaluate the accuracy of the model using real-time data from multiple ICU patients. Another multicenter research group has created the ELDER-ICU model using a machine learning algorithm to analyze data from a large-scale database to generate a better model for elderly patients²⁹. The authors found the model to be superior to traditional scoring systems²⁹, thus highlighting the importance of AI based tools in populations affected by age bias. This methodology can also be applied to other populations facing bias and can be incorporated into an individual model for each patient.

Table 1. AI solutions for disparities in the critical care setting

Critical care issue	Disparity	AI solution
ICU management and disposition	Bias in admitting and managing patients based on race, age, sex	AI based tools incorporate tools such as APACHE IV, SAPS II and SOFA to provide objective data on patient decompensation
Care Standardization	Implicit bias results in deviation from standard guidelines/nomograms	AI tools incorporate patient data into standardized algorithms/nomograms to provide high quality care
Accuracy of calculated lab data	Inaccurate lab data generated from older formulas i.e. MDRD equation	AI incorporates newer formulas corrected for patient demographics to provide more accurate lab results
Critical Care Research	Bias from investigators leading to issues with patient selection	AI algorithm can use objective measures to select potential research candidates, controlling against bias
Prognostication/Palliative care	Disparities in patient selection for palliative care resources in the critical care setting, inaccurate prognostic tools	Machine learning algorithms can identify patients with poorer prognosis, thereby triggering palliative care discussions
Informed Consent	Disparities in obtaining informed consent due to language barriers and cultural differences	AI based educational tools and visual aid materials aiding clinicians to obtain informed consent
Pain management/Prognostication	Bias against certain patient populations when prescribing pain medications	AI tools can use objective parameters to determine pain scores

Standardized patient centered care

One area of concern with evidence based care is the inability to offer individualized care across various critical care settings. While large healthcare bodies such as the American Heart Association (AHA), American Stroke Association (ASA), United States Preventive Services Task Force (USPSTF), etc. regularly release updated guidelines on the management of various conditions, they lack the nuance needed when dealing with individual critically ill patients hence cannot provide patient centered care. AI based learning systems are already being incorporated in Diabetes Management³⁰, Sleep medicine³¹, Oncology³², Radiological diagnoses³³ and many other fields to assist with management. Such concepts can also be applied to critical care. An AI based interface can access the most up to date guidelines and studies and incorporate real-time patient data to provide the most accurate management strategy for any given patient. These recommendations can account for variances in age, sex, ethnicity, and other factors that can induce bias against certain treatments. For instance, among the most used treatment protocol nomograms in the intensive care unit is the unfractionated heparin (UFH) drip protocol. The UFH drip is used as an anticoagulant treatment for arterial and

venous thromboembolic disease and is difficult to dose and requires frequent readjustments³⁴. Due to this challenge, a research group from Australia have developed a ML algorithm that is able to dose patients at a higher therapeutic rate than traditional methods leading to improved efficacy and decreased complications³⁵. Other machine learning models are also being described for dosing other common ICU medications such as Insulin³⁶ and digoxin³⁷.

In situations where clinical pictures can be deceiving or incomplete, ML tools and algorithms can provide probability scenarios and decision-making trees to providers who can then use their experience to make a more informed decision^{38,39}.

Improving accuracy for diagnostic data

When managing critically ill patients with multiple comorbidities, accuracy of laboratory data is of vital importance. Some of these values are directly measured by advanced machines while others such as creatinine clearance and glomerular filtration rate⁴⁰ are calculated using equations. As the glomerular filtration rate is essential for many diagnostic and treatment modalities including contrast imaging, medication

dosing and initiation of Renal Replacement Therapy (RRT) in certain scenarios, obtaining valid results is essential for patients in the ICU setting. The Modification of Diet in Renal Disease (MDRD) equation is the most widely used formula for glomerular filtration but has some serious drawbacks due to underestimation of glomerular filtration numbers at higher creatinine numbers and bias against certain ethnicities⁴¹. A study by Zelnick et al.⁴² evaluated a cohort of 1658 Black patients with chronic kidney disease found that current GFR calculations over-estimated the true value by 35% leading to a delay in referral for renal transplantation. Another review⁴³ confirmed that the traditional method of calculation was inaccurate for the black populations of South America and Africa as well confirming this racial bias. In order to combat this, Levey et al. have developed a new formula to correct for these errors and to control against variations across ethnicities, gender, and age but note that each individual patient may require their own formula based on their diet, ethnicity, age and other factors⁴⁴. Artificial Intelligence can be a solution to this problem and any others that arise from calculations affected by the demographics of a patient. An AI based learning tool can incorporate multiple variables and formulas to generate patient specific numbers for calculated laboratory data. It can also continuously update these calculations based on new research data and provide the computing power needed to keep up with complex equations.

Utility of AI based algorithms for critical care research processes

The existing disparities in research candidate selection in critical care are multifaceted, including issues such as racial and ethnic disparities, gender disparities, and the impact of socioeconomic status. Additional contributing factors include the healthcare setting, patients access to healthcare after discharge and geographical location⁴⁵. Inclusive practices are critical to ensure that underrepresented groups derive equitable benefit from pain research⁴⁶. Artificial Intelligence (AI) has the potential to improve precision and efficiency of candidate selection for ICU and critical care research. AI algorithms, equipped with deep learning capabilities, can sort through extensive datasets of patient information, including electronic health records, lab results, and clinical data, which can identify potential research candidates who meet specific predetermined criteria⁴⁷. This process, which has traditionally required extensive manual effort, can be

significantly fast tracked by AI, ensuring that researchers focus on the most suitable candidates, with reduced bias in patient selection. AI can uncover underlying subtle patterns and correlations in the extensive patient data which can be overlooked by human analysis, leading to a more diverse and comprehensive set of research candidates⁴⁸. A study utilized machine learning for unsupervised clustering of COVID-19 patient data, focusing on identifying sub-groups based on clinical features at hospital admission. The goal was to understand different disease courses and outcomes. The study highlighted how AI can uncover subtle patterns in patient data, enabling the formulation of new hypotheses for unpredictable patient outcomes⁴⁹. This ability is significant in critical care, where patient populations tend to be heterogeneous and complex. By leveraging AI capabilities, research in ICU and critical care settings can become more targeted, inclusive, and representative of a broader patient population, which will increase the validity and generalizability of the research findings⁵⁰. This approach can streamline the research process while leading to more personalized and effective treatment strategies, which will help improve patient outcomes in critical care environments^{51,52}.

AI based algorithms for pain identification and substance abuse

There are widespread preexisting disparities in pain management within the ICU/critical care setting. It has been shown that some racial, ethnic, and socioeconomic groups are at a higher risk of receiving suboptimal pain management. Minority populations, lower socioeconomic status, bias and prejudice on the part of healthcare provider and language barriers have all been documented as causes for suboptimal pain management in the setting of critical care/ICU⁵³. Higher pain tolerance and susceptibility to drug dependence cause suboptimal opioid drug usage in the ICU/critical care setting, further contributing to disparities in pain management⁵⁴. The application of Artificial Intelligence (AI) in managing pain tolerance and drug abuse in ICU patients, particularly those experiencing cardiac pain, is an emerging and transformative approach. AI systems, utilizing machine learning algorithms, are increasingly being deployed to analyze patient data for more accurate pain assessment and personalized pain management strategies. These AI-powered tools can help predict a patient's pain tolerance levels and susceptibility to drug abuse, enabling clinicians to tailor pain management protocols more

effectively⁵⁵. This is crucial for high complexity cardiac pain symptoms in the ICU. AI differs from human approaches in pain assessment by excelling in high-frequency data analysis, pattern recognition, and predictive analytics. It can detect subtle autonomic signs of pain, anticipate pain tolerance levels, and customize pain management strategies, particularly useful in complex ICU scenarios⁵⁶. A study by Rojas et al.⁵⁷ explores various sensing technologies that non-invasively measure changes in the Autonomic Nervous System (ANS) and Central Nervous System (CNS). These include metrics like heart rate, heart rate variability, electrodermal activity, and others. The study highlights a combination of AI with these technologies assists in making a more reliable and informed diagnosis of pain. This proactive approach can mitigate the risks of opioid addiction, a significant concern in pain management, by suggesting alternative pain control methods or adjusting drug dosages appropriately.

AI and palliative care access/prognostication

Palliative care has not been affected by AI, but there are many scenarios where it may be applicable. One of the areas where AI can be used is in cancer care⁵⁸. Cancer is a significant cause of mortality, and the use of AI could address some problems and improve prediction models. The use of both imaging and clinical data can lead to better prediction models for mortality and quality of life.

De Jong et al.⁵⁹ verified the accuracy of various prognostic models and scoring rules for short-term mortality in COVID-19 hospital admissions. The 30-day mortality or in-hospital deaths were the primary outcomes. There were multiple cohorts in Belgium, Brazil, China, Czech Republic, Egypt, France, Iran, Israel, Italy, Mexico, Netherlands, Portugal, Russia, Saudi Arabia, Spain, Sweden, United Kingdom, and United States that had been identified using a systematic review of covid-19 prediction models, expert knowledge and reference checking. There was a total of 8 prognostic models with different predictors identified and validated. The results and the prognostic value of the included models varied between data sources. The 4C Mortality Score by Knight et al (pooled C statistic 0.80; 95% confidence interval (CI) 0.75-0.84; 95% prediction interval (PI) 0.72-0.86) and clinical model by Wang et al (0.77; 0.73-0.80; 0.63-0.87) had the highest discriminative ability. There were 29% fewer deaths observed than predicted by the 4C Mortality Score (pooled O:E 0.71; 95% CI:0.45-1.11; 95% PI 0.21-2.39), 35% fewer than predicted by the

Wang clinical model (0.65; 0.52-0.82; 0.23-1.89), and 4% fewer than predicted by Xie et al's model (0.96; 0.59-1.55, 0.21-4.28). The final conclusion of the paper was that despite having numerous robust prediction models, calibration and generalizability remain a challenge. ML may be able to improve this as technology and data gathering continue to evolve.

Machine learning (ML) models have been used in the ICU to predict pathologies like delirium, acute kidney injury, sepsis⁶⁰ which will aid palliative care teams identify patients who may need more resources earlier in their care. These models can also assist in issues of cultural sensitivity and provide learning modules for providers looking to have difficult conversations with families.

AI and obtaining informed consent and capacity

Safe and ethical clinical practice necessitates the acquisition of patient consent before any medical or surgical procedures are performed. It is now common for part of the consent process to be delegated back to staff who are not performing the procedure⁶¹. This process can lead to disparities in obtaining consent from patients who are minorities or speak a different language⁶². A study by Natale et al.⁶³ found a significant number of parents of black and Hispanic children declined consent for trial enrollment in a pediatric ICU setting as compared to white parents possibly due to skepticism from these populations. One way to mitigate this is to use AI based tools to overcome this hesitation.

A case report by Moll et al.⁶⁴ utilized an AI tool to obtain informed consent for a patient receiving radiation therapy. The patient was allowed to ask the AI tool questions on the treatment in the presence of a physician to obtain informed consent prior to initiation. The AI tool did provide accurate answers to most questions but was not perceived as being an ideal solution by the patient due to a few inaccuracies and patient hesitation. Another limitation is the fact that the tool is public and open source and therefore not specifically trained in this particular use case. Overall, this case does highlight that an AI based tool with sufficient data can be used in conjunction with a healthcare provider to obtain informed consent in some scenarios.

Implicit bias in AI

It is important to note that AI too can be subject to bias, which can subsequently lead to disparities in care. The early nature of AI development and the lack of

advanced computing power makes AI susceptible to the implicit biases of those programming the algorithm. There is evidence to suggest that human designed algorithms that evaluate hospital metrics for health systems using healthcare costs or zip codes already have an innate racial bias^{65,66}. It follows then that any ML based algorithm designed on this protocol would demonstrate the same biases.

Biases can also be introduced during data collection, a key part of any AI system. One of the most popular areas for AI integration is radiology where numerous models are being developed to assist in the interpretation of imaging tests. Many imaging datasets in the United States, Asia and Europe do not report ethnicity in the demographic analysis⁶⁷ and often underrepresent minorities such as black patients. As this may be related to undertesting or inappropriate testing⁶⁸, it diminishes the generalizability and objectivity of these datasets that are often used in AI models. More care needs to be taken when designing algorithms and utilizing datasets for AI tools to ensure that bias is not introduced.

Conclusion

When caring for critically ill patients, care must be provided in an equitable manner as disparities can lead to a significant difference in outcomes. Advancements in Artificial Intelligence and Machine learning can help alleviate and even resolve many of these concerns. Areas such as mortality prediction, diagnostic accuracy, informed consent, pain control and palliative care can be improved with the use of AI and ML algorithms when used in conjunction with providers who are educated in the efficient use of these tools.

Funding

The authors declare that this work was carried out with the authors' own resources.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest.

Ethical considerations

Protection of human and animal subjects. The authors declare that no experiments were performed on humans or animals for this study.

Confidentiality of data. The authors declare that no patient data appear in this article. Furthermore, they have acknowledged and followed the recommendations as per the SAGER guidelines depending on the type and nature of the study.

Right to privacy and informed consent. The authors declare that no patient data appear in this article.

Use of artificial intelligence for generating text. The authors declare that they have not used any type of generative artificial intelligence for the writing of this manuscript, nor for the creation of images, graphics, tables, or their corresponding captions.

References

1. Mackey K, Ayers CK, Kondo KK, Saha S, Advani SM, Young S, et al. Racial and Ethnic Disparities in COVID-19-Related Infections, Hospitalizations, and Deaths: A Systematic Review. *Ann Intern Med.* 2021;174(3):362-73.
2. Griffee MJ, Thomson DA, Fanning J, Rosenberger D, Barnett A, White NM, et al. Race and ethnicity in the COVID-19 Critical Care Consortium: demographics, treatments, and outcomes, an international observational registry study. *Int J Equity Health.* 2023;22(1):260.
3. Modra LJ, Higgins AM, Abeygunawardana VS, Vithanage RN, Bailey MJ, Bellomo R. Sex Differences in Treatment of Adult Intensive Care Patients: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Crit Care Med.* 2022;50(6):913-23.
4. McGowan SK, Sarigiannis KA, Fox SC, Gottlieb MA, Chen E. Racial Disparities in ICU Outcomes: A Systematic Review. *Crit Care Med.* 2022;50(1):1-20.
5. Burdick KJ, Rees CA, Lee LK, Monuteaux MC, Mannix R, Mills D, et al. Racial & ethnic disparities in geographic access to critical care in the United States: A geographic information systems analysis. *PLoS One.* 2023;18(11):e0287720.
6. Kanter GP, Segal AG, Groeneveld PW. Income Disparities In Access To Critical Care Services. *Health Aff (Millwood).* 2020;39(8):1362-7.
7. Mohammed S, Matos J, Doutreligne M, Celi LA, Struja T. Racial Disparities in Invasive ICU Treatments Among Septic Patients: High Resolution Electronic Health Records Analysis from MIMIC-IV. *Yale J Biol Med.* 2023;96(3):293-312.
8. Ravi D, Iacob A, Profit J. Unequal care: Racial/ethnic disparities in neonatal intensive care delivery. *Semin Perinatol.* 2021;45(4):151411.
9. Baqui P, Bica I, Marra V, Ercole A, van der Schaar M. Ethnic and regional variations in hospital mortality from COVID-19 in Brazil: a cross-sectional observational study. *Lancet Glob Health.* 2020;8(8):e1018-e26.
10. Drefahl S, Wallace M, Mussino E, Aradhya S, Kolk M, Brandén M, et al. A population-based cohort study of socio-demographic risk factors for COVID-19 deaths in Sweden. *Nat Commun.* 2020;11(1):5097.
11. LaVeist TA. Disentangling race and socioeconomic status: a key to understanding health inequalities. *J Urban Health.* 2005;82(2 Suppl 3):iii26-34.
12. Jackson JW. Meaningful Causal Decompositions in Health Equity Research: Definition, Identification, and Estimation Through a Weighting Framework. *Epidemiology.* 2021;32(2):282-90.
13. Raine R, Goldfrad C, Rowan K, Black N. Influence of patient gender on admission to intensive care. *J Epidemiol Community Health.* 2002;56(6):418-23.
14. Arslani K, Tontsch J, Todorov A, Gysi B, Kaufmann M, Kaufmann F, et al. Temporal trends in mortality and provision of intensive care in younger women and men with acute myocardial infarction or stroke. *Crit Care.* 2023;27(1):14.
15. Merdji H, Long MT, Ostermann M, Herridge M, Myatra SN, De Rosa S, et al. Sex and gender differences in intensive care medicine. *Intensive Care Med.* 2023;49(10):1155-67.
16. Dhillion G, Grewal H, Monga V, Munjal R, Buddhavarapu VS, Verma RK, et al. Gender inclusive care toolkit for hospitals. *Lancet Reg Health Am.* 2023;26:100583.
17. Pilote L, Miller DP, Califf RM, Rao JS, Weaver WD, Topol EJ. Determinants of the use of coronary angiography and revascularization after thrombolysis for acute myocardial infarction. *N Engl J Med.* 1996;335(16):1198-205.
18. Stone PH, Thompson B, Anderson HV, Kronenberg MW, Gibson RS, Rogers WJ, et al. Influence of race, sex, and age on management of unstable angina and non-Q-wave myocardial infarction: The TIMI III registry. *Jama.* 1996;275(14):1104-12.

19. Munro PT, Smith RD, Parke TR. Effect of patients' age on management of acute intracranial haematoma: prospective national study. *BMJ*. 2002;325(7371):1001.
20. Hubbard RE, Lyons RA, Woodhouse KW, Hillier SL, Wareham K, Ferguson B, et al. Absence of ageism in access to critical care: a cross-sectional study. *Age Ageing*. 2003;32(4):382-7.
21. Vallet H, Schwarz GL, Flaatten H, de Lange DW, Guidet B, Dechartres A. Mortality of Older Patients Admitted to an ICU: A Systematic Review. *Crit Care Med*. 2021;49(2):324-34.
22. Guidet B, de Lange DW, Boumendil A, Leaver S, Watson X, Boulanger C, et al. The contribution of frailty, cognition, activity of daily life and comorbidities on outcome in acutely admitted patients over 80 years in European ICUs: the VIP2 study. *Intensive Care Med*. 2020;46(1):57-69.
23. Zangmo K, Khwannimit B. Validating the APACHE IV score in predicting length of stay in the intensive care unit among patients with sepsis. *Scientific Reports*. 2023;13(1):5899.
24. Le Gall JR, Lemeshow S, Saulnier F. A new Simplified Acute Physiology Score (SAPS II) based on a European/North American multicenter study. *Jama*. 1993;270(24):2957-63.
25. Kashyap R, Sherani KM, Dutt T, Gnanapandithan K, Sagar M, Vallabhajosyula S, et al. Current Utility of Sequential Organ Failure Assessment Score: A Literature Review and Future Directions. *Open Respir Med J*. 2021;15:1-6.
26. Beck DH, Smith GB, Pappachan JV, Millar B. External validation of the SAPS II, APACHE II and APACHE III prognostic models in South England: a multicentre study. *Intensive Care Med*. 2003;29(2):249-56.
27. Sarkar R, Martin C, Mattie H, Gichoya JW, Stone DJ, Celi LA. Performance of intensive care unit severity scoring systems across different ethnicities in the USA: a retrospective observational study. *Lancet Digit Health*. 2021;3(4):e241-e9.
28. Tang H, Jin Z, Deng J, She Y, Zhong Y, Sun W, et al. Development and validation of a deep learning model to predict the survival of patients in ICU. *J Am Med Inform Assoc*. 2022;29(9):1567-76.
29. Liu X, Hu P, Yeung W, Zhang Z, Ho V, Liu C, et al. Illness severity assessment of older adults in critical illness using machine learning (ELDER-ICU): an international multicentre study with subgroup bias evaluation. *Lancet Digit Health*. 2023;5(10):e657-e67.
30. Tahir F, Farhan M. Exploring the progress of artificial intelligence in managing type 2 diabetes mellitus: a comprehensive review of present innovations and anticipated challenges ahead. *Front Clin Diabetes Healthc*. 2023;4:1316111.
31. Verma RK, Dhillon G, Grewal H, Prasad V, Munjal RS, Sharma P, et al. Artificial intelligence in sleep medicine: Present and future. *World J Clin Cases*. 2023;11(34):8106-10.
32. Wanderley MC, Soares CMA, Morais MMM, Cruz RM, Lima IRM, Chojniak R, et al. Application of artificial intelligence in predicting malignancy risk in breast masses on ultrasound. *Radiol Bras*. 2023;56(5):229-34.
33. Grewal H, Dhillon G, Monga V, Sharma P, Buddhavarapu VS, Sidhu G, et al. Radiology Gets Chatty: The ChatGPT Saga Unfolds. *Cureus*. 2023;15(6):e40135.
34. Zimmermann AT, Jeffries WS, McElroy H, Horowitz JD. Utility of a weight-based heparin nomogram for patients with acute coronary syndromes. *Intern Med J*. 2003;33(1-2):18-25.
35. Abdel-Hafez A, Scott IA, Falconer N, Canaris S, Bonilla O, Marxen S, et al. Predicting Therapeutic Response to Unfractionated Heparin Therapy: Machine Learning Approach. *Interact J Med Res*. 2022;11(2):e34533.
36. Shifrin M, Siegelmann H. Near-optimal insulin treatment for diabetes patients: A machine learning approach. *Artif Intell Med*. 2020;107:101917.
37. Hu YH, Tai CT, Tsai CF, Huang MW. Improvement of Adequate Digoxin Dosage: An Application of Machine Learning Approach. *J Healthc Eng*. 2018;2018:3948245.
38. Elhazmi A, Al-Omari A, Sallam H, Mufti HN, Rabie AA, Alshahrani M, et al. Machine learning decision tree algorithm role for predicting mortality in critically ill adult COVID-19 patients admitted to the ICU. *J Infect Public Health*. 2022;15(7):826-34.
39. Brigo F, Turcato G, Lattanzi S, Orlandi N, Turchi G, Zabolli A, et al. Machine learning validation through decision tree analysis of the Epidemiology-Based Mortality Score in Status Epilepticus. *Epilepsia*. 2022;63(10):2507-18.
40. Shahbaz H, Gupta M. Creatinine Clearance. *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing Copyright © 2023, StatPearls Publishing LLC.; 2023.
41. Stevens LA, Coresh J, Feldman HI, Greene T, Lash JP, Nelson RG, et al. Evaluation of the modification of diet in renal disease study equation in a large diverse population. *J Am Soc Nephrol*. 2007;18(10):2749-57.
42. Zelnick LR, Leca N, Young B, Bansal N. Association of the Estimated Glomerular Filtration Rate With vs Without a Coefficient for Race With Time to Eligibility for Kidney Transplant. *JAMA Netw Open*. 2021;4(1):e2034004.
43. Zingano CP, Escott GM, Rocha BM, Porgere IF, Moro CC, Delanaye P, et al. 2009 CKD-EPI glomerular filtration rate estimation in Black individuals outside the United States: a systematic review and meta-analysis. *Clin Kidney J*. 2023;16(2):322-30.
44. Levey AS, Stevens LA, Schmid CH, Zhang YL, Castro AF, 3rd, Feldman HI, et al. A new equation to estimate glomerular filtration rate. *Ann Intern Med*. 2009;150(9):604-12.
45. Barr J, Paulson SS, Kamdar B, Ervin JN, Lane-Fall M, Liu V, et al. The Coming of Age of Implementation Science and Research in Critical Care Medicine. *Crit Care Med*. 2021;49(8):1254-75.
46. Janevic MR, Mathur VA, Booker SQ, Morais C, Meints SM, Yeager KA, et al. Making Pain Research More Inclusive: Why and How. *J Pain*. 2022;23(5):707-28.
47. Rockenschaub P, Akay EM, Carlisle BG, Hilbert A, Meyer-Eschenbach F, Näher A-F, et al. Generalisability of AI-based scoring systems in the ICU: a systematic review and meta-analysis. *medRxiv*. 2023:2023.10.11.23296733.
48. Galzin E, Roche L, Vlachomitrou A, Nempont O, Carolus H, Schmidt-Richberg A, et al. Additional value of chest CT AI-based quantification of lung involvement in predicting death and ICU admission for COVID-19 patients. *Res Diagn Interv Imaging*. 2022;4:100018.
49. Cowley HP, Robinette MS, Matelsky JK, Xenos D, Kashyap A, Ibrahim NF, et al. Using machine learning on clinical data to identify unexpected patterns in groups of COVID-19 patients. *Scientific Reports*. 2023;13(1):2236.
50. Thangavelu SD, Supriyanto E, Yahya A, Yazid MHA, Kalearasu S, Kalearasu A, editors. *Fuzzy Based Multimodality Clinical Alarm in ICU/CCU*. 2022 International Conference on Healthcare Engineering (ICHE); 2022 23-25 Sept. 2022.
51. Parameshachari B, Srinivas C, Rekha H, Harshitha P, Deepak R, editors. *An IoT-Based CNN Model for Patients in ICU Beds During the COVID-19 Outburst*. 2023 International Conference on Data Science and Network Security (ICDSNS); 2023: IEEE.
52. Li C, Zhou R, Chen G, Hao X, Zhu T. Knowledge mapping and research hotspots of artificial intelligence on ICU and Anesthesia: from a global bibliometric perspective. *Anesthesiology and Perioperative Science*. 2023;1(4):33.
53. Bekanich SJ, Wanner N, Junkins S, Mahoney K, Kahn KA, Berry CA, et al. A multifaceted initiative to improve clinician awareness of pain management disparities. *Am J Med Qual*. 2014;29(5):388-96.
54. Martyn JAJ, Mao J, Bittner EA. Opioid Tolerance in Critical Illness. *N Engl J Med*. 2019;380(4):365-78.
55. Jones CM, Danaher L, Milne MR, Tang C, Seah J, Oakden-Rayner L, et al. Assessment of the effect of a comprehensive chest radiograph deep learning model on radiologist reports and patient outcomes: a real-world observational study. *BMJ Open*. 2021;11(12):e052902.
56. Gordon E. AI is Revolutionizing the Treatment of Substance Use Disorders [Available from: <https://www.pgitech.org/news-and-publications/teq-ai-substance-use>].
57. Fernandez Rojas R, Brown N, Waddington G, Goecke R. A systematic review of neurophysiological sensing for the assessment of acute pain. *NPJ Digit Med*. 2023;6(1):76.
58. Reddy V, Nafees A, Raman S. Recent advances in artificial intelligence applications for supportive and palliative care in cancer patients. *Curr Opin Support Palliat Care*. 2023;17(2):125-34.
59. Jong VMTd, Rousset RZ, Antonio-Villa NE, Buenen AG, Calster BV, Bello-Chavolla OY, et al. Clinical prediction models for mortality in patients with covid-19: external validation and individual participant data meta-analysis. *BMJ*. 2022;378:e069881.
60. Greco M, Caruso PF, Cecconi M. Artificial Intelligence in the Intensive Care Unit. *Semin Respir Crit Care Med*. 2021;42(1):2-9.
61. Allen JW, Earp BD, Koplin J, Wilkinson D. Consent-GPT: is it ethical to delegate procedural consent to conversational AI? *J Med Ethics*. 2024.
62. Molina RL, Adams E, Aguayo R, Truong S, Hacker MR. Disparities in Comprehension of the Obstetric Consent According to Language Preference Among Hispanic/Latinx Pregnant Patients. *Cureus*. 2022;14(7):e27100.
63. Natale JE, Lebet R, Joseph JG, Ulyse C, Ascenzi J, Wypij D, et al. Racial and Ethnic Disparities in Parental Refusal of Consent in a Large, Multisite Pediatric Critical Care Clinical Trial. *J Pediatr*. 2017;184:204-8.e1.
64. Moll M, Heilemann G, Georg D, Kauer-Dörner D, Kuess P. The role of artificial intelligence in informed patient consent for radiotherapy treatments—a case report. *Strahlenther Onkol*. 2024.
65. Obermeyer Z, Powers B, Vogeli C, Mullainathan S. Dissecting racial bias in an algorithm used to manage the health of populations. *Science*. 2019;366(6464):447-53.
66. Nordling L. A fairer way forward for AI in health care. *Nature*. 2019;573(7775):S103-s5.
67. Yi PH, Kim TK, Siegel E, Yahyavi-Firouz-Abadi N. Demographic Reporting in Publicly Available Chest Radiograph Data Sets: Opportunities for Mitigating Sex and Racial Disparities in Deep Learning Models. *J Am Coll Radiol*. 2022;19(1 Pt B):192-200.
68. Shan A, Baumann G, Gholamrezae-zhad A. Patient Race/Ethnicity and Diagnostic Imaging Utilization in the Emergency Department: A Systematic Review. *J Am Coll Radiol*. 2021;18(6):795-808.

Abordaje del paro cardíaco transoperatorio en adultos durante procedimientos neuroquirúrgicos. Artículo de revisión

Approach to intraoperative cardiac arrest in adults during neurosurgical procedures. Review article

Luis E. Arévalo-Gutiérrez

Servicio de Anestesiología, Hospital General, Instituto Salvadoreño del Seguro Social, San Salvador, El Salvador

Resumen

La posición más común y recomendada para realizar la reanimación cardiopulmonar es la posición supina; sin embargo, los anestesiólogos pueden encontrar situaciones en las que los pacientes sufren un paro cardíaco (PC) en decúbito prono, como en cirugías de columna cervical y lumbar. El PC perioperatorio y transoperatorio es una de las complicaciones más temidas, con un pronóstico variado. Se estima una incidencia de 5.6 por cada 10,000 casos. Los pacientes con clasificación ASA II a IV constituyen más del 60% de los casos de PC, y más de la mitad de los pacientes se encuentran entre los 50 y 79 años de edad. El PC transoperatorio puede ocurrir por patologías cardíacas propias del paciente, pérdida masiva de sangre o manipulación de la médula espinal; el error humano está implicado en el 53% de los casos y el 22% son totalmente atribuibles a la anestesia. Complicaciones como la asistolia, la fibrilación ventricular y la actividad eléctrica sin pulso ocurren con frecuencia y están asociadas con un mal pronóstico durante procedimientos neuroquirúrgicos, y su manejo sigue siendo poco definido, por lo que se realizó una búsqueda de artículos originales, reportes de casos, revisiones sistemáticas y metaanálisis en las bases de datos PubMed, ScienceDirect y EBSCO con el objetivo de proporcionar a los anestesiólogos y residentes de anestesiología una fuente actualizada de los avances en la identificación y el manejo del PC en procedimientos neuroquirúrgicos.

Palabras clave: Paro cardíaco. Asistolia en sala de operaciones. Paciente neuroquirúrgico. Neuroanestesia.

Summary

The most common and recommended position for performing cardiopulmonary resuscitation is the supine position, however, anesthesiologists may encounter situations where patients suffer cardiac arrest (CP) in the prone position, such as in cervical and lumbar spine surgeries. Perioperative and transoperative CP is one of the most feared complications with a varied prognosis; an estimated incidence of 5.6 per 10,000 cases; patients with ASA II to IV make up > 60% of CP cases, more than half of patients are between 50 and 79 years of age. Transoperative CP can occur due to the patient's own cardiac pathologies, massive blood loss or manipulation of the spinal cord, where human error is involved in 53% of cases and 22% are entirely attributable to anesthesia. Complications such as asystole, ventricular fibrillation and pulseless electrical activity occur frequently and are associated with a poor prognosis during neurosurgical procedures and their management remains poorly defined, so we searched the databases of PubMed, ScienceDirect and EBSCO, with the goal of providing anesthesiologists and anesthesiology residents with an up-to-date source of advances in the identification and management of a CP in neurosurgical procedures.

Keywords: Cardiac arrest. Asystole in the operating room. Neurosurgical patient. Neuroanesthesia.

Correspondencia:

Luis E. Arévalo-Gutiérrez

E-mail: dr_arevalo82@hotmail.com

Fecha de recepción: 29-11-2023

Fecha de aceptación: 30-01-2024

DOI: 10.24875/RECC.23000019

Disponible en internet: 06-06-2024

REduCritic. 2024;3(2):85-97

www.reducritic.com

2938-1304 / © 2024 Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI). Publicado por Permanyer. Éste es un artículo open access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

El paro cardíaco (PC) es una de las complicaciones más temidas en el perioperatorio y el transoperatorio. Las estadísticas proporcionadas por la investigación llevada a cabo por Nunnally et al.¹ indican que los pacientes con clasificación ASA II a IV constituyen más del 60% de los casos de PC, más de la mitad de los pacientes se encuentran entre los 50 y 79 años de edad, y las cirugías de cabeza suponen el 8.13%, mientras que las de columna se sitúan en el 2.76%. El PC durante la anestesia para cirugía no cardíaca en adultos ocurre con una incidencia del 0.01% al 0.34%²; la principal causa durante la anestesia fue una hemorragia masiva (31.9%), el error humano estuvo implicado en el 53% y el 22% fueron atribuibles a la anestesia². El anestesiólogo sufre un impacto emocional y la mayoría experimentan culpa, depresión, ansiedad, insomnio, miedo a demandas, miedo a ser juzgados por colegas, ira y revivir el evento³.

El PC durante el transoperatorio se presenta en pacientes monitorizados, y muchas veces se puede anticipar y conocer su causa. Los pacientes se encuentran con acceso intravenoso, y los fármacos y el desfibrilador están fácilmente accesibles; por lo tanto, la supervivencia se acerca al 50% y cuando se relaciona únicamente con la anestesia se ha informado una supervivencia cercana al 80%⁴. En procedimientos neuroquirúrgicos es frecuente encontrar eventos como bradicardia, hipotensión o hipertensión, los cuales habitualmente son autocontrolados y de poca duración. Sin embargo, complicaciones como la asistolia, la fibrilación ventricular (FV) y la actividad eléctrica sin pulso (AESP) ocurren con frecuencia y están asociadas con un mal pronóstico. Las compresiones torácicas y la desfibrilación pueden ser un desafío debido al posicionamiento o la exposición quirúrgica requeridos para el procedimiento. Durante un PC, el cerebro sufre una lesión primaria y secundaria debido a una incapacidad de los mecanismos de autorregulación intrínsecos para compensar la falta de flujo sanguíneo⁵. La reanimación cardiopulmonar (RCP) de alta calidad produce un flujo de sangre al cerebro que no es tan efectivo como la función cardíaca normal; la lesión cerebral como resultado de este compromiso se denomina lesión isquémica hipóxica⁵. Alrededor del 92% de los anestesiólogos han experimentado al menos un PC durante su carrera, con notable afección psicológica y escaso o inexistente apoyo institucional⁶. Existe una relación entre la atención anestésica y la probabilidad de ocurrencia de perjuicio directo o indirecto derivado

de esta, evidenciando la necesidad de los estudios de mortalidad perioperatoria como herramientas orientativas para la prevención de acontecimientos futuros y como un indicador global del acceso seguro a la atención quirúrgica y anestésica⁷. Por ello se realiza esta revisión, con el objetivo de proporcionar a los anestesiólogos y los residentes de anestesiología una fuente actualizada de los avances en la identificación y el manejo del PC en procedimientos neuroquirúrgicos.

Método

La revisión se basó en la búsqueda de artículos científicos relacionados con el abordaje del PC en procedimientos neuroquirúrgicos en las bases de datos PubMed, ScienceDirect y EBSCO, utilizando las palabras clave “paro cardíaco”, “asistolia en sala de operaciones”, “paciente neuroquirúrgico” y “neuroanestesia”. Se incluyeron estudios publicados en inglés y español desde 2006 hasta la fecha de la búsqueda. Se excluyeron los estudios que no estaban relacionados con el tema de interés, como aquellos que se referían a PC en otros procedimientos que no fueran neuroquirúrgicos.

Resultados

De los 455 artículos elegibles se excluyeron los que no se relacionaban con PC en procedimientos neuroquirúrgicos, quedando un total de 47 artículos, los cuales se utilizaron para la presente revisión. A continuación, se resumen los datos más importantes sobre el daño neuronal en el PC, la fisiología y la secuencia de maniobras de RCP, la etapa posparo cardíaco y los mecanismos de PC en procedimientos neuroquirúrgicos.

Discusión

A pesar de representar solo el 2% del peso corporal, el cerebro recibe entre el 15% y el 20% del gasto cardíaco total para mantener la homeostasis⁸. La viabilidad del tejido cerebral depende fuertemente del suministro constante de oxígeno y de sustratos energéticos, concretamente glucosa. Para mantener la integridad celular necesita en torno a un 40-50% del total del flujo sanguíneo cerebral (FSC), y para realizar actividades electrofisiológicas un 50-60%⁸. Los estudios en humanos demuestran que la consciencia se pierde a los 4-10 segundos de FSC ausente, mientras que el electroencefalograma (EEG) se vuelve isoelectrico después 10-30 segundos de asistolia^{9,10}. La arritmia intraoperatoria inesperada puede indicar enfermedad arterial coronaria

Tabla 1. Mecanismos de lesión neuronal

Mecanismo	Complicaciones
Falla energética	La falta de oxígeno provoca el fallo de producción de ATP que conduce a fallo crítico de la función celular
Fallo de bomba	Pérdida de la integridad de la membrana celular, provoca hinchazón y acumulación de toxinas/desechos
Cascada inflamatoria	Liberación de diversas citocinas, causando inflamación e hinchazón celular
Excitotoxicidad	Desregulación de neurotransmisores, la actividad eléctrica excesiva conduce a muerte celular y convulsiones
Cascada de coagulación	Formación de coágulos dentro de los vasos cerebrales debido a una deficiencia de anticoagulante endógeno, conduce a accidentes vasculares cerebrales
Deterioro en la autorregulación cerebral	Desregulación de la vasculatura cerebral, conduce a flujo sanguíneo cerebral inadecuado hacia diferentes regiones cerebrales, causando derrames cerebrales o hemorragias

subyacente, valvulopatía o anomalías en la conducción, y requerir la interrupción de la cirugía para el diagnóstico; además, puede representar efectos secundarios reconocidos de un anestésico utilizado. Los eventos que terminan afectando el encéfalo ocurren por mecanismos de lesión primaria (isquemia) y secundaria (reperfusión) que secuencialmente suceden durante el paro, la resucitación y la fase aguda tras la resucitación¹¹.

Lesión primaria

Posterior al PC, la inconsciencia sobreviene en escasos segundos, el electroencefalograma se vuelve isoelectrico en los primeros 10-30 segundos y los potenciales evocados corticales pueden continuar generándose algunos minutos después^{10,11}. El metabolismo neuronal es altamente dependiente del aporte de glucosa y oxígeno por parte de la circulación sanguínea. La integridad celular de la neurona depende de la bomba de Na^+/K^+ y del ATP que resulta del metabolismo aeróbico de la glucosa en las mitocondrias¹². Al paralizarse esta bomba, el Na^+ , por gradiente de concentración, ingresará al interior de la neurona, y con él lo hará el agua, ocasionando edema celular citotóxico verdadero, el cual puede observarse de manera temprana en imágenes de resonancia magnética (RM) y tardía en la tomografía computarizada (TC)¹². Concomitante con la entrada de Na^+ al interior de la célula ocurre también la salida de K^+ , así como la apertura de los canales sensibles de Ca^{++} y su ingreso a la neurona¹². A los pocos segundos de un PC, la falta de perfusión cerebral inicia una cascada de procesos destructivos que conducen a una lesión neuronal (Tabla 1).

Lesión secundaria

El FSC normal es de 60-70 ml/100 g/min en la sustancia gris y de 25 ml/100 g/min en la sustancia blanca. El masaje cardíaco en la RCP solo alcanza el 25% del FSC normal, porcentaje bastante bajo para alcanzar los límites mínimos que aseguren la integridad celular y evitar el daño neuronal¹¹. Cuando hay restablecimiento de la circulación espontánea, el arribo circulatorio a los lechos vasculares cerebrales isquémicos desencadena una serie de eventos nocivos, llamados lesión secundaria¹³. La noxa isquémica libera glutamato que genera ingreso adicional de Ca^{++} a la neurona, y el colapso energético intracelular permite la liberación del Ca^{++} contenido en el retículo endoplasmático que activa enzimas líticas, como lipasas, caspasas y proteasas, que contribuyen al daño en organelos intracelulares como las mitocondrias, principales generadoras de ATP en la cadena de electrones¹¹⁻¹³. Por otra parte, la activación del sistema inmunitario innato involucra elementos celulares como la microglía y los leucocitos, que liberan citocinas y amplían la respuesta inflamatoria local permitiendo la apertura de la barrera hematoencefálica y la formación de edema cerebral¹¹⁻¹³ (Tabla 2).

Paro cardiorrespiratorio

Se entiende por paro cardiorrespiratorio (PCR) la interrupción brusca y potencialmente reversible de la respiración y la circulación¹⁴. La RCP es la piedra angular para los pacientes que desarrollan un PCR¹⁵. En el ambiente intrahospitalario, el PCR suele relacionarse con trastornos extracardiacos de origen respiratorio,

Tabla 2. Mecanismos de lesión cerebral secundaria tras una lesión cerebral isquémica hipóxica

Fisiopatología	Mecanismo	Complicaciones
Edema cerebral	Edema cerebral citotóxico y vasogénico	Aumento de la PIC y disminución de la presión de perfusión cerebral, disminución del FSC, hernia y muerte cerebral
Anemia	Disminución del contenido de oxígeno arterial	Isquemia cerebral
Autorregulación cerebral deteriorada	Autorregulación estrecha y desplazada a la derecha	Presión hemodinámica cerebral pasiva, isquemia cerebral e hiperemia
Disfunción microvascular	Microtrombos, vasoconstricción cerebral, interrupción de la barrera hematoencefálica	Aumento de la resistencia cerebrovascular, disminución del FSC, disminución del suministro cerebral de oxígeno, edema cerebral vasogénico
Dióxido de carbono	Vasoconstricción inducida por hipocapnia, vasodilatación inducida por hipercapnia	Disminución del FSC, isquemia cerebral, aumento de la PIC, disminución de la presión de perfusión cerebral
Hipertermia	Aumento de CMRO ₂ , disminución del umbral convulsivo, inducción de apoptosis	Crisis metabólica de células neuronales, muerte celular no convulsiva, aumento de CMRO ₂ , muerte de células neuronales

CMRO₂: consumo metabólico regional de oxígeno; FSC: flujo sanguíneo cerebral; PIC: presión intracraneal.

hemodinámico o neurológico que ocasionan una disminución crítica de la oxigenación miocárdica produciendo una disminución de la contractilidad que culmina en AESP y finalmente asistolia. Se utiliza el término «cadena de supervivencia» para contemplar las siguientes acciones básicas secuenciales: reconocimiento inmediato y acceso temprano, RCP básica oportuna, desfibrilación temprana, soporte avanzado temprano y cuidados posterior al RCP; esta cadena debe ser implementada dentro de los primeros 4 minutos del evento para que los pacientes tengan mayores posibilidades de sobrevivir con buenos resultados neurológicos¹⁴. La RCP moderna fue descrita por el anestesiólogo Peter Safar y sus colaboradores en la década de 1960 con el objetivo de tratar los PCR presenciados en las salas de cirugía, y poco a poco se extendió su uso no solo a las ramas médicas, sino también a la población en general¹⁶.

MANEJO DEL PARO CARDIORRESPIRATORIO

La RCP se define como la realización de respiración artificial, compresiones cardíacas, administración de fármacos y desfibrilación eléctrica con el objetivo de incrementar la oxigenación a los tejidos, proteger el cerebro, preservar la circulación y llevar oxígeno a los órganos vitales¹⁴. El sistema de apoyo vital básico seguido por el apoyo vital avanzado, con la inclusión de intubación endotraqueal, terapia con líquidos intravenosos, electrocardiografía y ventilación mecánica, fueron agrupados en los lineamientos del Comité de

RCP de la American Heart Association (AHA)¹⁷. Para que sea eficaz, la aplicación de la RCP debe sustentarse en un sistema organizado, incluida la capacitación del personal en cada uno de los pasos, desde el reconocimiento de la situación hasta la aplicación de protocolos y técnicas en la ejecución de la cadena de supervivencia¹⁷.

Ante la sospecha de un PCR en una persona que clínicamente presente datos compatibles con apnea o se compruebe la ausencia de pulso por 10 segundos, se debe activar el sistema de emergencia e iniciar la RCP de inmediato^{18,19}.

REANIMACIÓN CARDIOPULMONAR BÁSICA

El objetivo principal de las maniobras de RCP es promover el flujo sanguíneo sistemático priorizando la perfusión al corazón y al cerebro¹⁸. Las maniobras básicas son relativamente sencillas y se basan en la compresión torácica y asegurar la oxigenación sanguínea. Entre las características de calidad se encuentran que la compresión tenga una profundidad de 5-6 cm, a una frecuencia de 100-120 por minuto, permitiendo la reexpansión completa del tórax y con el mínimo de interrupciones^{18,19}. En el ambiente hospitalario, una vez colocado el tubo endotraqueal o el dispositivo supraglótico, la ventilación debe realizarse una cada 6 segundos de forma continua con las compresiones; el objetivo es la adecuada ventilación y oxigenación durante la RCP. La intubación orotraqueal es el método

Tabla 3. Déficit neurológicos según el área cerebral

Área cerebral	Déficit neurológicos
Hipocampo	Déficit de memoria
Cerebelo y ganglios basales	Mioclono, descoordinación y anomalías de la marcha
Corteza y tálamo	Atención, procesamiento y déficit del funcionamiento ejecutivo
Tronco encefálico	Desregulación de la presión arterial, temperatura, frecuencia cardíaca y respiración
Corteza, tálamo y tronco encefálico	Nivel de consciencia y consciencia

óptimo y definitivo para asegurar la permeabilidad y el aislamiento de la vía aérea; además de facilitar la ventilación a un volumen corriente seleccionado y el aporte de oxígeno, previene la distensión gástrica, permite el aspirado de secreciones y es una vía alternativa para la administración de fármacos¹⁸.

REANIMACIÓN CARDIOPULMONAR AVANZADA

La RCP avanzada son aquellas medidas que se deben aplicar para el tratamiento definitivo de un PCR. Consta de varios apartados que se deben ir realizando de manera simultánea: optimización de la vía aérea y ventilación, accesos vasculares, fármacos, líquidos intravenosos, diagnóstico y tratamiento de las arritmias¹⁸. La reanimación inmediata con desfibrilación ha demostrado tener mejores resultados siempre y cuando se realice en los primeros 15 minutos desde la aparición de las arritmias cardíacas¹⁸. Los agentes vasoconstrictores siguen siendo utilizados sistemáticamente en la RCP; el actualmente recomendado es la epinefrina, dado que la evidencia científica no apoya un beneficio superior de la vasopresina¹⁹. Su efecto vasoconstrictor es mediado a través de receptores alfa-1 y alfa-2 adrenérgicos, beta-1 y beta-2 adrenérgicos; los receptores beta-1 adrenérgicos ubicados en el miocardio estimulan la función contráctil, y este efecto acentúa la isquemia miocárdica¹⁹.

Cuando la causa principal del PCR sea reversible, el objetivo del tratamiento es restaurar por completo las funciones cardíaca y cerebral. Las principales causas de PCR son arritmia primaria o inducida por isquemia, embolia pulmonar, hemorragia, traumatismo o medicación/sobredosis de drogas; todos requieren esfuerzos emergentes para aumentar la circulación cardiocerebral²⁰. Comprender la compleja fisiología de la perfusión cardiocerebral durante la RCP es crucial para reducir la morbilidad y la mortalidad después de un paro cardíaco²⁰.

FISIOLOGÍA DE LA REANIMACIÓN CARDIOPULMONAR CONVENCIONAL

La RCP convencional o estándar se realiza con un par manos; con cada compresión torácica, la presión intratorácica aumenta y el corazón se comprime entre el esternón y la columna²⁰. En la última década ha habido un renovado interés en el efecto del aumento de la presión intratorácica sobre la presión intracraneal (PIC) durante la fase de compresión. Durante esta fase, la PIC aumenta, lo que a su vez incrementa la resistencia a la perfusión cerebral. Se especuló que la elevación y la disminución de la PIC durante la RCP son secundarias a cambios en la presión intratorácica transducida a través del plexo venoso paravertebral/epidural y el líquido cefalorraquídeo hasta el compartimento intracraneal. Las presiones de la aurícula derecha, del ventrículo derecho y de la arteria pulmonar aumentan en paralelo con cada compresión. Por lo tanto, las presiones altas del lado derecho durante la RCP también limitan las presiones de perfusión coronaria²⁰. Estos cambios en la PIC durante las fases de compresión y descompresión ayudan a determinar el nivel de perfusión cerebral durante la RCP²⁰.

Etapa posparo cardíaco

Existe una amplia gama de déficit neurológicos posterior a un PC, que se correlacionan con la vulnerabilidad de ciertas regiones cerebrales a sufrir lesión anóxica debido a la dependencia del oxígeno. Estos sitios son el hipocampo, el cerebelo, los ganglios basales, la corteza y el tálamo. Los trastornos de la consciencia y del estado de alerta (mediado por la corteza, el tálamo y el tronco encefálico) son a menudo los más evidentes en la fase aguda de lesión²¹ (Tabla 3).

La edad temprana, el sexo femenino, el ritmo de paro no desfibrilable y el PC prolongado (> 30 min) son factores de riesgo importantes para la progresión a muerte cerebral²¹.

La mayoría de los pacientes con resultado neurológico favorable después de un PC comienzan a recuperar la consciencia unas pocas horas después del cese de la sedación intravenosa²². El *shock* circulatorio, la insuficiencia renal, la edad avanzada y el uso de agentes sedantes de acción prolongada se han asociado con tiempos más prolongados para recuperar la consciencia. El despertar tardío (> 4-5 días después de restablecimiento de la circulación espontánea) está asociado con una mayor probabilidad de sufrir déficits neurológicos graves y peor calidad de vida²².

Los estudios de imágenes también son métodos importantes para la evaluación pronóstica de la función cerebral en los pacientes con PC. La TC y la RM convencionales son menos sensibles para detectar los cambios patológicos de hipoxia-isquemia sistémica transitoria porque el daño de la neurona en este estado no implica la destrucción de estructuras neuronales²³. Un estudio utilizó un método para detectar diferencias entre la materia blanca y la gris para reflejar un edema citotóxico cerebral global grave; al detectar la relación de la materia gris y la blanca en el putamen y la cápsula interna, la especificidad de predecir mal pronóstico neurológico en pacientes dentro de 1 a 7 días después de un PC fue del 100% y la sensibilidad alcanzó el 44%²³. Las secuencias avanzadas de RM, como el coeficiente de difusividad aparente, el tensor de difusión imágenes y la RM funcional en estado de reposo, se pueden utilizar para el pronóstico y la evaluación después de un PC²³.

El Doppler transcraneal se ha utilizado en cuidados neurocríticos durante décadas. Se puede realizar junto a la cama con poco o ningún riesgo para los pacientes. Tiene una resolución temporal de 5 ms y mide aspectos clave como la velocidad del FSC y el índice de pulsatilidad, que permiten evaluaciones continuas en tiempo real de los índices de autorregulación de los pacientes, la PIC, la distensibilidad y el FSC²⁴. La muerte celular neuronal se produce por hipoperfusión o isquemia durante el PC, pero también por una variedad de reacciones bioquímicas y circulatorias durante los primeros días después del restablecimiento de la circulación espontánea²⁵. Este último incluye etapas sucesivas de vasoparálisis e hiperemia relativa, alteración de la vasoconstricción y dilatación, y eventual restauración del FSC. La hipotermia inducida disminuye el metabolismo cerebral y la disminución en la producción de especies de producción de lactato, que limitan la excitotoxicidad previniendo los efectos perjudiciales de la liberación de catecolaminas y la degeneración tisular desencadenada por el calcio y el metabolismo anaeróbico; además, se

observan una disminución en la producción de especies reactivas de oxígeno, la permeabilidad de la membrana mitocondrial, el sistema inmunitario, la infiltración celular, la producción de citocinas inflamatorias y la preservación de la barrera hematoencefálica²⁵. Mantener la temperatura en un rango entre 32 y 36 °C ha sido una de las principales estrategias terapéuticas para mejorar el resultado neurológico en los cuidados tras un PC²⁵.

Mecanismos de paro cardiorrespiratorio en neurocirugía

Los eventos adversos cardíacos intraoperatorios, que incluyen bradicardia, hipotensión, hipertensión y arritmias en pacientes neuroquirúrgicos, se presentan con frecuencia y en general son de naturaleza transitoria; sin embargo, complicaciones cardíacas más graves, incluyendo FV, asistolia y AESP, ocurren en algunos pacientes y pueden tener consecuencias catastróficas si no se actúa rápidamente⁶. La mayoría de los pacientes neuroquirúrgicos estarán intubados, tendrán monitoreo de dióxido de carbono al final de la espiración (EtCO₂) y una cánula arterial permanente para el control directo de la presión arterial; ambos se pueden utilizar para confirmar el diagnóstico clínico de PC, proporcionar una guía útil sobre la calidad de la RCP en términos de la eficacia de las compresiones torácicas e indicar el restablecimiento de la circulación espontánea²⁶.

Una vez confirmado el PC, se inicia la reanimación y se comprueba rápidamente lo siguiente (Fig. 1):

- Si el paciente está siendo ventilado:
 - Que el tubo no esté obstruido, doblado ni desplazado fuera de la tráquea ni hacia un bronquio principal.
 - Que el paciente no se encuentre desconectado del ventilador.
 - Que exista una concentración adecuada de oxígeno inspirado.
- Que todos los fármacos anestésicos se administran en la dosis y la velocidad correctas.
- Que no existe una pérdida repentina de sangre no identificada.

Cirugía supratentorial

El reflejo trigéminocardiaco (RTC) es la causa más común de PC. Puede ocurrir con la estimulación de cualquier ramo sensorial del nervio trigémino y produce bradicardia, hipotensión, apnea y asistolia²⁶. El RTC es un reflejo complejo del tronco encefálico que incluye

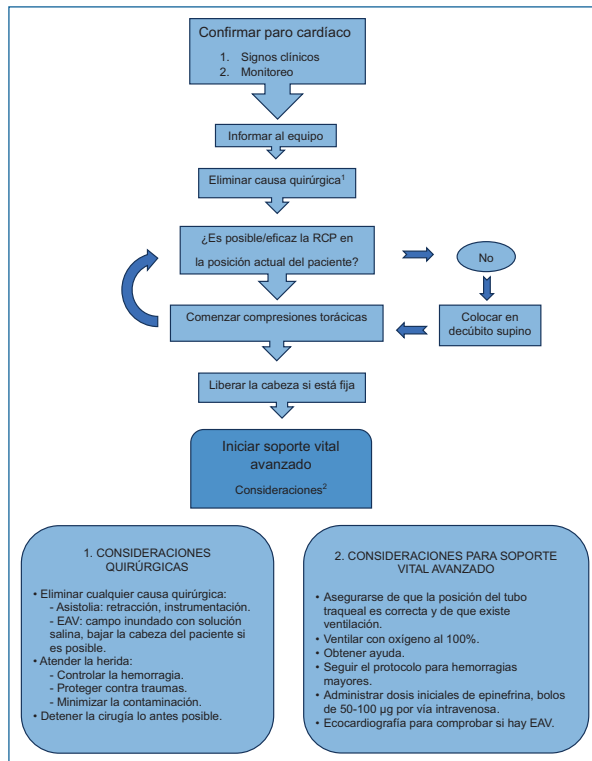


Figura 1. Algoritmo de paro cardíaco en neurocirugía. EAV: embolia aérea venosa; RCP: reanimación cardiopulmonar. *Reproducida con la amable autorización de Resuscitation Council UK.*

nervios craneales, ganglios y varios núcleos. La vía aferente está formada por el nervio trigémino y los núcleos del tronco encefálico, y las conexiones eferentes se realizan a través del nervio vago. Cuando hay un estímulo (fisiológico o patológico), las señales se transmiten al núcleo sensorial del trigémino a través del ganglio de Gasser, la vía aferente continúa a lo largo de fibras del nervio internuncial corto en la formación reticular para conectarse con la vía eferente en el núcleo motor del nervio vago²⁷, activando las neuronas vagales del sistema parasimpático cardioinhibidor, que terminan en el miocardio, causando efectos cronotrópicos e inotrópicos negativos^{27,28}.

Varios factores desencadenantes predisponen a episodios de RTC de manera directa o indirecta, incluyendo hipercapnia, hipoxemia, profundidad anestésica superficial, edad más joven (con tono vagal alto en reposo), narcóticos, uso preoperatorio de betabloqueantes, bloqueadores de los canales de calcio y acidosis. Algunos factores intraoperatorios, como un plano anestésico superficial, hipercapnia, hipoxia y

acidosis, son corregibles, y por lo tanto se deben manejar rápidamente²⁷. En cuanto al manejo, uno de los primeros pasos más importantes es informar al cirujano para que cese el estímulo, pues con ello la mayoría de las veces revierte el fenómeno. La administración de anticolinérgicos, como atropina o glicopirrolato, puede ser necesaria en algunos casos en que la bradicardia es grave o persiste a pesar del cese del estímulo²⁷. Sin embargo, la atropina solo bloquea fibras colinérgicas, posiblemente porque la respuesta depresora del trigémino incluye la activación de las fibras cardiinhibitorias vagales y la inhibición de la vasoconstricción adrenérgica; en situaciones raras, es posible que se requiera apoyo de vasopresores como la epinefrina²⁷.

La estimulación cortical insular, la estimulación límbica, la manipulación de la amígdala y otros tipos de estimulación del tronco encefálico se han relacionado con el PC durante la cirugía supratentorial electiva²⁹. La irrigación con solución salina se ha relacionado con el paro sinusal y la bradicardia grave; la estimulación de la amígdala y del tronco encefálico son los posibles mecanismos de este raro fenómeno²⁹.

La presencia de hipertensión intracraneana es la causa, a través del reflejo de Cushing (hipertensión arterial, bradicardia y apnea), de episodios de inestabilidad cardiovascular que en ocasiones puede llegar a progresar a bradicardia e inclusive a asistolia, a pesar de que el reflejo se define como protector, pues asegura la perfusión cerebral en presencia de hipertensión intracraneana³⁰. En términos generales, este reflejo se desencadena por agentes anestésicos o quirúrgicos (ruptura de aneurismas, hemorragias o convulsiones intraoperatorias), pero se ha visto que la disminución de la PIC ocasiona más efectos cardíacos adversos en comparación con su aumento³⁰. Un drenaje demasiado rápido del líquido cefalorraquídeo durante la colocación de derivaciones ventriculoperitoneales, la colocación de un drenaje subgaleal de presión negativa para permitir la evacuación de un posible sangrado después de la craneotomía y en general cualquier procedimiento que produzca presión negativa en el cerebro ocasionan una disminución de la PIC³¹.

La bradicardia neurogénica puede ser provocada por la activación del reflejo glossofaríngeo-vagal debido a la estimulación directa del nervio glossofaríngeo^{32,33}. Los impulsos del nervio glossofaríngeo viajan a través del tracto solitario del mesencéfalo comunicándose con el núcleo solitario, donde la neurotransmisión excitadora al núcleo dorsal (motor) del vago aumenta la actividad parasimpática en el corazón, ocasionando bradicardia

refleja y asistolia; además, envía señales inhibitorias a las astas intermediolaterales en la médula espinal a través de la médula ventrolateral rostral, disminuyendo el flujo simpático hacia los vasos sanguíneos, manifestándose como hipotensión posvasodilatación^{32,33}. Estos eventos se han descrito durante la resección de schwannomas cerebromedulares, así como en la sección de la raíz vagal para la neuralgia glossofaríngea³².

Cirugía de la base del cráneo

Esta zona se distingue por ser un espacio muy pequeño que contiene estructuras de extraordinaria importancia en el control neurofisiológico del aparato cardiovascular, que incluyen el tallo cerebral y el piso del cuarto ventrículo. La mayoría de los reportes son relativos a tumores del ángulo pontino, malformación de Chiari y tumores cerebelosos³⁴. Estos sitios están asociados con reflejos trigeminales secundarios a la manipulación del tumor, la cauterización del tentorio cerebeloso o la elongación del trigémino, así como a la irrigación con soluciones en esta zona³⁴.

En los procedimientos quirúrgicos de la base del cráneo, como cirugías de la hipófisis, descompresión microvascular y procedimientos ablativos para la neuralgia del trigémino, se han informado asistolia y bradicardia grave en cirugías hipofisarias transesfenoidales y comúnmente se atribuyen al RTC²⁸. El nervio trigémino proporciona inervación sensorial tanto a los tejidos nasales como al seno cavernoso, y su estimulación puede ocurrir en cualquier ramo sensorial a lo largo de su vía. Este reflejo puede ocurrir hasta en un 10-12% de las cirugías hipofisarias transesfenoidales^{28,35}.

Cirugía de fosa posterior

Muchas estructuras vitales están contenidas en este espacio limitado, incluidos el tronco encefálico, el piso del cuarto ventrículo y los nervios craneales. Pueden ocurrir diversas complicaciones cardiovasculares intraoperatorias y posoperatorias incluso con ligeras manipulaciones de las raíces vagas superiores y del nervio glossofaríngeo. La mayoría de los eventos cardíacos adversos se informan en cirugías relacionadas con tumores del ángulo pontocerebeloso, malformación de Chiari, tumores cerebelosos y la posición sentada³⁶. También hay numerosos informes de detención mediada por el RTC durante la cirugía del ángulo pontocerebeloso, con asistolia secundaria a la manipulación del tumor, cauterización de la tienda del cerebelo,

manipulación o tracción del nervio trigémino³⁶. La FV también se ha atribuido a la estimulación vagal y al vasoespasma coronario resultante durante la cirugía de ángulo pontocerebeloso³⁶. La estimulación del tronco encefálico se ha implicado como causa de asistolia durante la descompresión de la fosa posterior y se ha tratado con éxito con el cese del estímulo quirúrgico junto con la administración de atropina^{28,36}. La embolia aérea venosa (EAV) se ha informado igualmente como causa de bradicardia y asistolia en cirugía de fosa posterior realizada en decúbito prono^{28,36}; puede ser detectada por la disminución de los niveles de EtCO₂, además de con Doppler transesofágico³⁴. El tratamiento de la EAV consiste en cambiar la posición del paciente debido al compromiso hemodinámico; se procede a nivelar la cabeza del paciente a la aurícula derecha colocándolo en decúbito lateral, supino o prono, dependiendo del procedimiento quirúrgico, y adicionalmente se puede aspirar el aire a través de un catéter venoso central³⁷.

Cirugía vascular cerebral

Las perturbaciones cardíacas, incluidas las anomalías electrocardiográficas, la hipertensión y las arritmias, se describen comúnmente en la hemorragia subaracnoidea aneurismática²⁸. Hay muchos informes de eventos cardíacos catastróficos durante el clipaje de un aneurisma y en cirugías de malformaciones arteriovenosas, y estos con frecuencia se atribuyen a descargas simpáticas³⁸. La hemorragia subaracnoidea es reconocida como una causa de arritmia cardíaca y de lesión neurogénica del miocardio, que puede manifestarse como un colapso circulatorio repentino. Un aumento en la PIC, una reducción de la presión de perfusión cerebral, la lesión primaria del hipotálamo y los centros vasomotores del tronco encefálico pueden desencadenar la cascada de acontecimientos que conducen al PC³⁹. El aumento de las catecolaminas que resulta de una hemorragia subaracnoidea también contribuye a la disfunción miocárdica en forma de miocardio neurogénico aturdido, que se sabe que afecta al 10-30% de los pacientes con hemorragia subaracnoidea³⁹. Se ha producido asistolia transitoria durante el clipaje de un aneurisma de la arteria comunicante anterior, en el momento del desprendimiento dural de la cresta esfenoidal³⁸. Esto se atribuyó a que el RTC se produjo como consecuencia de la estimulación del ramo meníngeo medio del nervio trigémino. De manera similar, se ha informado que el RTC es una causa de asistolia durante la colocación de un clip en la porción

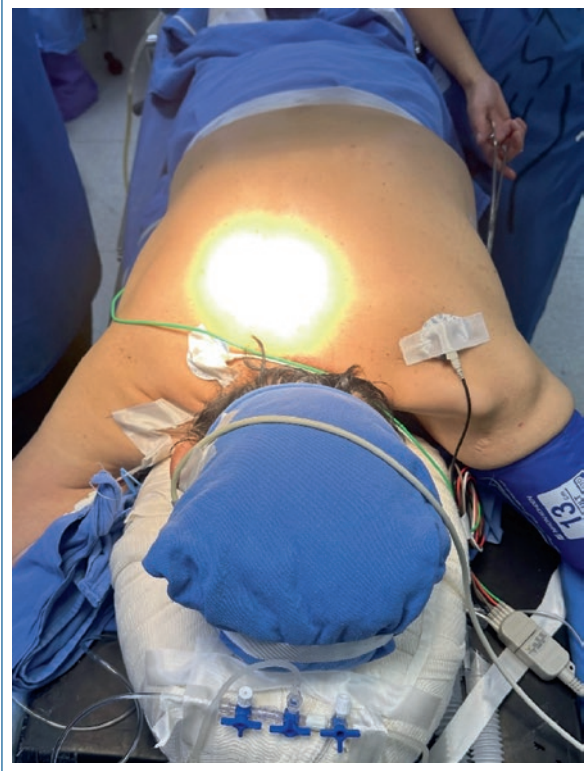


Figura 2. Posición de decúbito prono para resección de un tumor invasivo de columna.

supraclinoidea de la arteria carótida interna³⁸. El vasoespasmio coronario también se ha descrito como una causa de alteraciones hemodinámicas graves asociadas con anomalías del ST durante el clipaje del aneurisma, incluyendo bradicardia con bloqueo auriculoventricular completo, taquicardia ventricular, AESP e hipotensión⁴⁰.

Cirugía cervical y toracolumbar

A pesar de llevarse a cabo en posición prona, la EAV puede presentarse por la apertura de los plexos venosos localizados en la unión craneocervical⁴¹. La frecuencia de aparición de EAV es mayor en procedimientos craneales que en procedimientos de columna⁴¹. La EAV ocurre cuando se introduce aire en el sistema venoso en un estado de baja presión y la burbuja de aire o émbolo es transportado a la aurícula derecha, luego al ventrículo derecho y eventualmente causa obstrucción del flujo de salida del ventrículo derecho con inestabilidad hemodinámica⁴⁰. Esto ha ocurrido en cirugía de escoliosis, laminectomía lumbar y descompresión para tumores invasivos de columna²⁸ (Fig. 2).

Las cirugías cervicales con plan de fijación de la columna cervical después de un traumatismo o una sección medular pueden ser motivo de manifestaciones vagales importantes. Las fibras nerviosas simpáticas preganglionares emergen de la médula espinal del primero al cuarto nivel torácico, mientras que el parasimpático está representado por el nervio vago, el cual se origina a nivel superior en el bulbo^{34,40}. En los pacientes con sección medular a nivel cervical existe separación de las fibras simpáticas, tanto cardíacas como vasomotoras, de los centros superiores; en contraste, el vago queda intacto, por lo que se convierte en predominante, dando como consecuencia la posibilidad de choque neurogénico manifestado por bradicardia grave, hipotensión y asistolia^{34,42}.

Otro aspecto de interés durante la cirugía de columna cervical es la cercanía del seno carotídeo, el cual, al ser inervado por el vago, desempeña un papel en la regulación de la frecuencia cardíaca y del tono vascular periférico⁴². En el curso de la cirugía cervical para reparación de hernias discales, el cirujano necesita una visión clara de la columna cervical del lado derecho, en donde está localizado el seno carotídeo, y no es infrecuente su manipulación, por lo que cabe la posibilidad de arritmias, hipotensión y asistolia⁴².

El colapso cardiovascular durante la cirugía de columna también puede ocurrir debido a lesión vascular y pérdida aguda de sangre, y se han informado numerosos casos durante la cirugía de columna lumbar^{34,43}. El vaso que se lesiona con más frecuencia es la arteria ilíaca común izquierda, que está situada inmediatamente por delante del cuarto disco intervertebral lumbar. Sin embargo, la lesión también puede afectar a la arteria ilíaca común derecha, las venas ilíacas, la aorta o la vena cava inferior^{34,43}. El sangrado puede ser evidente en el sitio quirúrgico, pero también puede ser oculto, en el abdomen o en el retroperitoneo⁴³.

Posiciones en neurocirugía

Muchos de los procedimientos se llevan a cabo en otras posiciones que no son la supina, como prono, lateral, sentado o semisentado^{34,44}. En ciertos procedimientos intracraneales y de la columna cervical superior, la cabeza del paciente se mantiene en una posición rígida y fija mediante el cabezal de Mayfield. Esto evita cualquier movimiento de la cabeza, lo cual es requisito durante ciertos procedimientos neuroquirúrgicos (por ejemplo, al usar un microscopio quirúrgico o un marco de cirugía estereotáxica)⁴⁴.



Figura 3. Posición prona para cirugía de la fosa posterior.



Figura 4. Posición del banco del parque (*park bench*) para cirugía del ángulo pontocerebeloso.

POSICIÓN SUPINA

El acceso al paciente para realizar compresiones torácicas y colocar los parches del desfibrilador es fácil; sin embargo, cualquier intento de realizar compresiones

torácicas con la cabeza fija con el cabezal de Mayfield supone un riesgo de causar lesiones en el cuero cabelludo, el cráneo y la columna cervical a medida que el torso se mueve con la cabeza fija⁴⁴. Un efecto similar también puede ocurrir como resultado de un movimiento involuntario si se realiza una desfibrilación, y también existe un riesgo teórico de que la desfibrilación provoque quemaduras en el lugar de inserción de los clavos. Se inicia la RCP mientras el cirujano sostiene la cabeza del paciente, y si se requiere desfibrilación, entonces el soporte para la cabeza debe fijarse a la mesa de operaciones o el paciente debe moverse corporalmente a lo largo de la mesa para proporcionar un descanso seguro a su cabeza^{28,44}.

POSICIÓN PRONA

La posición prona está asociada con varios cambios fisiológicos, que incluyen disminución del gasto cardíaco, compresión de la vena cava inferior, reducción del retorno venoso y redistribución del flujo sanguíneo pulmonar⁴⁵. La compresión de las venas en las extremidades inferiores aumenta el riesgo de tromboembolia venosa intraoperatoria como causa de arritmia; y en combinación con pérdida de sangre e hipovolemia intraoperatoria relacionadas con la posición elevan el riesgo de arritmias cardíacas con inestabilidad hemodinámica⁴⁵. Pueden requerirse cinco o seis personas o más de 3 minutos para reposicionar al paciente a decúbito supino⁴⁶ (Fig. 3).

Tan pronto como se inicia la RCP debe retirarse cualquier instrumento del sitio quirúrgico y tapar la herida para reducir la pérdida de sangre. Las compresiones torácicas pueden ser difíciles cuando los pacientes están en decúbito prono. Las paletas desfibriladoras se pueden colocar en posiciones biaxiales o posterolaterales (una paleta en la línea axilar media izquierda y la segunda sobre la escápula derecha)^{46,47}. Mediante TC, en pacientes en posición prona, se localizó el área de la columna dorsal mejor situada anatómicamente en relación directa con el ventrículo izquierdo; este punto se encuentra de 0 a 2 segmentos vertebrales por debajo de la línea que une los ángulos inferiores de las escápulas. La colocación de las manos entre T7 y T9 localiza la sección transversal más grande del ventrículo izquierdo, por lo que la aplicación de las compresiones cardíacas en este sitio probablemente sea más efectiva, optimizando así el gasto cardíaco requerido^{34,46}.

Si las compresiones torácicas son ineficaces, mediante la monitorización de la presión arterial, la EtCO₂ o la falta de pulso central, el equipo anestésico

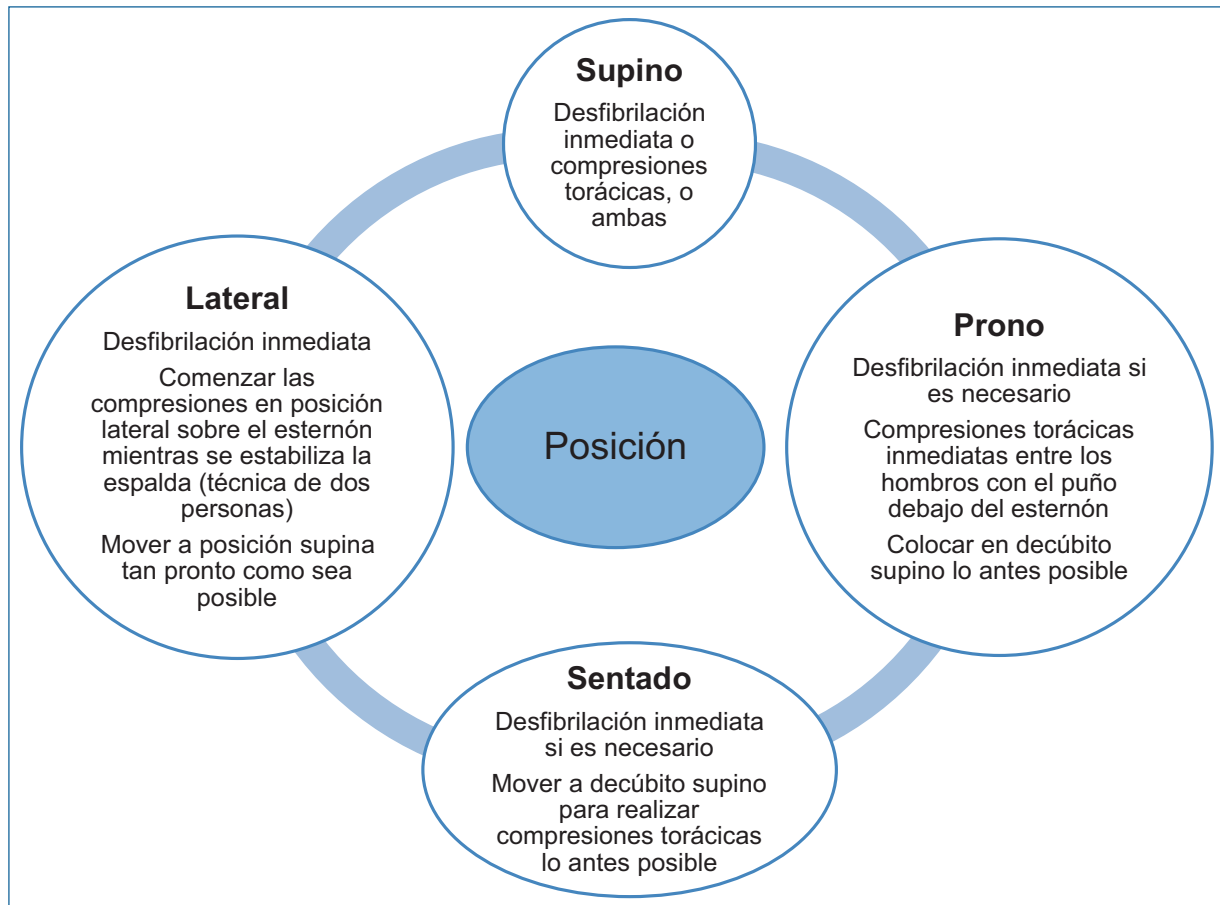


Figura 5. Algoritmo de manejo del paro cardíaco según la posición neuroquirúrgica.

y quirúrgico debe colocar al paciente en decúbito supino; lograrlo puede ser difícil, llevar mucho tiempo y ser peligroso debido a la presencia de una herida abierta o una columna inestable⁴⁴. Durante las compresiones externas en decúbito supino, el diafragma y las vísceras abdominales están desplazadas caudalmente porque la pared abdominal anterior no es rígida y parte de la fuerza aplicada se disipa⁴⁶. Durante la RCP en decúbito prono, la eficacia de las compresiones puede aumentar debido a la restricción del movimiento de las estructuras abdominales si la pared abdominal anterior permanece en contacto con una superficie firme⁴⁶. Asimismo, las compresiones posteriores pueden deprimir el esternón más eficientemente debido a la superficie dura colocada debajo de este, aumentando la fuerza hacia los ventrículos y la rápida reducción del volumen intratorácico. Una posible desventaja de la RCP en decúbito prono es que puede ser más extenuante que en la posición supina debido a una articulación costovertebral más rígida que requiere más presión para comprimir⁴⁶.

POSICIÓN LATERAL

La experiencia de RCP en posición lateral es limitada y con algunos inconvenientes. Se han descrito las maniobras de compresión proporcionadas por dos rescatadores: uno de ellos realizándolas en el pecho y el otro en la espalda empujando simultáneamente³⁴. Se desconoce su eficacia, por lo que se debe colocar al paciente en decúbito supino lo antes posible y con la mayor seguridad posible⁴⁴. Si está indicada la desfibrilación en posición lateral izquierda o derecha, la colocación de los parches sobre el ápice cardíaco o debajo de la clavícula derecha puede estar impedida, y por lo tanto se recomienda el uso de la posición anteroposterior, con un parche encima el precordio izquierdo y el otro justo debajo de la escápula izquierda⁴⁴ (Fig. 4).

POSICIÓN SENTADA

La posición sentada puede predisponer a complicaciones hemodinámicas debido a EAV, neumoencéfalo a tensión o irritación de las raíces nerviosas²⁸. Esta

posición se logra colocando al paciente en una silla o mesa de operaciones especial que pueda convertirse para lograr una posición sentada, y la cabeza del paciente generalmente se fija usando una abrazadera. Aunque normalmente hay acceso al tórax para permitir la desfibrilación, las compresiones no serán posibles, por lo que para hacerlas se debe colocar al paciente en posición supina^{34,44}.

En la [figura 5](#) se muestra un algoritmo de manejo del PC según la posición quirúrgica.

Se proponen algunos puntos a considerar según la presentación:

- En caso de bradicardia, administrar atropina o epinefrina de acuerdo con los lineamientos de la AHA para el soporte vital cardiovascular avanzado.
- En caso de asistolia, FV o AESP, informar al cirujano, pedir el cese de cualquier estímulo y confirmar el diagnóstico.
- Una vez confirmado el diagnóstico, iniciar de inmediato la RCP.
- Seguir el protocolo establecido por la AHA y buscar y tratar las posibles causas: ¿embolia aérea, lesión del tallo cerebral, lesión del hipotálamo, reflejo vagal? Pensar en las 5H: hipovolemia, hipoxia, hidrogeniones–acidosis, hiper/hipocalemia, otros metabolitos e hipotermia; y en las 5T: tabletas (drogas orales, accidental), tamponamiento cardíaco, neumotórax a tensión, trombosis coronaria y tromboembolismo pulmonar.
- En los pacientes con alto riesgo de arritmia que no están en decúbito supino o cuando el acceso es restringido deben colocarse los parches de desfibrilación antes de situar al paciente en la mesa y comenzar la cirugía. Se pueden utilizar para monitorización, desfibrilación y cardioversión.
- Uso temprano de la ecocardiografía para guiar el diagnóstico y el tratamiento, especialmente en pacientes con AESP.

Conclusión

El cerebro normalmente puede adaptarse para prevenir la hipoxia cerebral durante un PC a través del proceso de autorregulación, pero estos mecanismos fallan en ausencia de FSC, lo que conduce a una cascada que resulta en lesión neurológica. La RCP temprana de alta calidad mitiga algunas lesiones, pero la mortalidad después de un PC sigue siendo alta. No existe en la actualidad una técnica que permita predecir las complicaciones cardíacas intraoperatorias en procedimientos

neuroquirúrgicos; por otro lado, el manejo de estas complicaciones ha evolucionado con el desarrollo de nuevos fármacos, procedimientos de resucitación y un mayor conocimiento de los mecanismos de acción de los fármacos convencionalmente utilizados, lo que permite dar esperanza a un mayor número de pacientes con las menores secuelas posibles.

No es tan frecuente que los anestesiólogos presencien un PC durante un procedimiento neuroquirúrgico; una comprensión adecuada de los mecanismos y de las opciones de manejo ayudarán a minimizar los efectos adversos. La naturaleza solitaria de la práctica de la anestesia, la rareza de estos eventos y la evidencia de que es poco probable que los anestesiólogos reciban apoyo profesional después de un evento, los hace particularmente propensos a sufrir angustia psicológica si experimentan la muerte o una lesión grave de un paciente.

Financiamiento

El autor declara que este trabajo se realizó con recursos propios.

Conflicto de intereses

El autor declara no tener conflicto de intereses.

Consideraciones éticas

Protección de personas y animales. El autor declara que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos. El autor declara que en este artículo no aparecen datos de pacientes. Además, los autores han reconocido y seguido las recomendaciones según las guías SAGER dependiendo del tipo y naturaleza del estudio.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. El autor declara que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Uso de inteligencia artificial para generar textos. El autor declara que no ha utilizado ningún tipo de inteligencia artificial generativa en la redacción de este manuscrito ni para la creación de figuras, gráficos, tablas o sus correspondientes pies o leyendas.

Bibliografía

1. Nunnally ME, O'Connor MF, Kordylewski H, Westlake B, Dutton RP. The incidence and risk factors for perioperative cardiac arrest observed in the national anesthesia clinical outcomes registry. *Anesth Analg*. 2015;120:364-70.

2. Jaiswal AK, Gupta D, Verma N, Behari S. Trigemino-cardiac reflex: a cause of sudden asystole during cerebellopontine angle surgery. *J Clin Neurosci*. 2010;17:641-4.
3. Gazoni FM, Amato PE, Malik ZM, Durieux ME. The impact of perioperative catastrophes on anesthesiologists: results of a national survey. *Anesth Analg*. 2012;114:596-603.
4. Bainbridge D, Martin J, Arango M, Cheng D; Evidence-based Perioperative Clinical Outcomes Research (EPICOR) Group. Perioperative and anaesthetic-related mortality in developed and developing countries: a systematic review and meta-analysis. *Lancet*. 2012;380:1075-81.
5. van den Brule JMD, van der Hoeven JG, Hoedemaekers CWE. Cerebral perfusion and cerebral autoregulation after cardiac arrest. *BioMed Res Int*. 2018;2018:4143636.
6. Watters DA, Hollands MJ, Gruen RL, Maoate K, Perndt H, McDougall RJ, et al. Perioperative mortality rate (POMR): a global indicator of access to safe surgery and anaesthesia. *World J Surg*. 2015;39:856-64.
7. Aparicio-Morales A, Hernández-Pérez J, Pérez-Álvarez V. Mortalidad perioperatoria. Hospital Universitario Clínico Quirúrgico Arnaldo Milián Castro. 2015-2018. *Revista Cubana de Anestesiología y Reanimación*. 2020;19(3). Disponible en: <https://revanestesia.sld.cu/index.php/anes-tRean/article/view/633>.
8. Buunk G, van der Hoeven JG, Meinders AE. Cerebral blood flow after cardiac arrest. *Neth J Med*. 2000;57:106-12.
9. Pana R, Homby L, Shemie SD, Dhanani S, Teitelbaum J. Time to loss of brain function and activity during circulatory arrest. *J Crit Care*. 2016;34:77-83.
10. Shemie SD, Gardiner D. Circulatory arrest, brain arrest and death determination. *Front Cardiovasc Med*. 2018;5:15.
11. Torres-Zafra J, Poveda Henao CM, Niño Ramírez L, González Quintero J. Lesión cerebral post paro cardíaco: aspectos médicos, éticos y legales. *Acta Neurol Colomb*. 2023;39:57-68.
12. Mulder M, Geocadin RG. Neurology of cardiopulmonary resuscitation. *Handb Clin Neurol*. 2017;141:593-617.
13. Sekhon MS, Ainslie PN, Griesdale DE. Clinical pathophysiology of hypoxic ischemic brain injury after cardiac arrest: a "two-hit" model. *Crit Care*. 2017;21:90.
14. Gazmuri RJ. Reanimación cardiopulmonar intra-hospitalaria del paciente adulto. *Rev Med Clin Condes*. 2017;28:228-38.
15. Guía de Referencia Rápida: Guía de Práctica Clínica. Reanimación cardiopulmonar en adultos. México: CENETEC; 2017. Disponible en: <https://www.cenetec-difusion.com/CMGPC/IMSS-633-13/ER.pdf>.
16. Gempeler R, Fritz E. Reanimación cardiopulmonar más allá de la técnica. *Colombian Journal of Anesthesiology*. 2015;43:142-6.
17. Balcázar-Rincón LE, Mendoza-Solís LA, Ramírez-Alcántara YL. Reanimación cardiopulmonar: nivel de conocimientos entre el personal de un servicio de urgencias. *Rev Esp Med Quir*. 2015;20:248-55.
18. Diosdado M. Vía aérea avanzada en la reanimación cardiopulmonar: ¿cuándo y cómo hacerlo? *Cad Aten Primaria*. 2013;19:184-9.
19. Wyckoff MH, Greif R, Morley PT, Ng KC, Olasveengen TM, Singletary EM, et al. 2022 International Consensus on Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care Science With Treatment Recommendations: Summary From the Basic Life Support; Advanced Life Support; Pediatric Life Support; Neonatal Life Support; Education, Implementation, and Teams; and First Aid Task Forces. *Circulation*. 2022;146:e483-557.
20. Lurie KG, Nemergut EC, Yannopoulos D, Sweeney M. The physiology of cardiopulmonary resuscitation. *Anesth Analg*. 2016;122:767-83.
21. Medicherla CB, Lewis A. The critically ill brain after cardiac arrest. *Ann N Y Acad Sci*. 2022;1507:12-22.
22. Sandroni C, Cronberg T, Sekhon M. Brain injury after cardiac arrest: pathophysiology, treatment, and prognosis. *Intensive Care Med*. 2021;47:1393-414.
23. Ma Q, Feng L, Wang T, Li Y, Li Z, Zhao B, et al. 2020 Expert consensus statement on neuro-protection after cardiac arrest in China. *Ann Transl Med*. 2021;9:175.
24. Jha RM, Elmer J. Transcranial dopplers after cardiac arrest: should we ride this wave? *Resuscitation*. 2019;141:204-6.
25. Lüsebrink E, Binzenhöfer L, Kellnar A, Scherer C, Schier J, Kleeberger J, et al. Targeted temperature management in postresuscitation care after incorporating results of the TTM2 trial. *J Am Heart Assoc*. 2022;11:e026539.
26. Prause G, Archon S, Gemes G, Kallenböck F, Smolnikov I, Schuchlenz H, et al. Tight control of effectiveness of cardiac massage with invasive blood pressure monitoring during cardiopulmonary resuscitation. *Am J Emerg Med*. 2010;28:746.e5-6.
27. Chowdhury T, Rosemann T, Schaller B. Breve reseña del reflejo trigémino cardíaco. *Rev Argent Cardiol*. 2018;86:74-83.
28. Chowdhury T, Petropolis A, Cappellani RB. Cardiac emergencies in neurosurgical patients. *Biomed Res Int*. 2015;2015:751320.
29. Kim Y, Chang CH, Ham SY, Han DW. A brief cardiac arrest due to saline irrigation during surgery for infratentorial cerebellar tumor. *Korean J Anesthesiol*. 2013;65(6 Suppl):S111-2.
30. Dinallo S, Waseem M. Cushing reflex. En: *StatPearls*. Treasure Island, FL: StatPearls Publishing; 2023 Jan. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK549801/>.
31. Yadav M, Nikhar SA, Kulkarni DK, Gopinath R. Cardiac arrest after connecting negative pressure to the subgaleal drain during craniotomy closure. *Case Rep Anesthesiol*. 2014;2014:146870.
32. Tomar GS, Mishra RK, Chaturvedi A. Glossopharyngeal vagal reflex: a matter of concern during neurosurgery. *Neurol India*. 2018;66:1822-4.
33. Khurram Ijaz M. Reflejos del tronco encefálico durante la neurocirugía: una descripción general. *World Federation of Societies of Anaesthesiologists*. Tutorial 452. Neuroanesthesia. Disponible en: https://resources.wfsahq.org/wp-content/uploads/ato-452-00.en_es-final-1.pdf.
34. Suárez-Morales M, Mendoza-Popoca CU. Paro cardíaco en neurocirugía. *Anestesia en Neurocirugía*. 2018;41(Supl 1):S87-9.
35. Abou-Zeid AH, Davis JR, Kearney T, Gnanalingham KK. Transient asystole during endoscopic transsphenoidal surgery for acromegaly: an example of trigeminocardiac reflex. *Pituitary*. 2009;12:373-4.
36. Jaiswal AK, Gupta D, Verma N, Behari S. Trigemino-cardiac reflex: a cause of sudden asystole during cerebellopontine angle surgery. *J Clin Neurosci*. 2010;17:641-4.
37. Muñoz-Báez K, Díaz-Arroyo JA, Morales-Mendoza JP, Ramos-Villegas Y, Corrales-Santander H, Florez WA, et al. Emergencias cardíacas en pacientes neuroquirúrgicos. *Rev Chil Neurocir*. 2021;46:153-60.
38. Spiriev T, Kondoff S, Schaller B. Trigemino-cardiac reflex during temporary clipping in aneurysmal surgery: first description. *J Neurosurg Anesthesiol*. 2011;23:271-2.
39. Feldstein E, Domínguez JF, Kaur G, Patel SD, Dicipinigitis AJ, Semaan R, et al. Cardiac arrest in spontaneous subarachnoid hemorrhage and associated outcomes. *Neurosurg Focus*. 2022;52:E6.
40. Al-Mohammad A, Soghakhawari, Muirhead W, Dinner L, Murphy M. Intraoperative pulseless electrical activity cardiac arrest during intracranial aneurysm clipping: case report. *Neurosurg Cases Rev*. 2022;5:130.
41. Cruz AS, Moisi M, Page J, Tubbs RS, Paulson D, Zwillman M, et al. Venous air embolus during prone cervical spine fusion: case report. *J Neurosurg Spine*. 2016;25:681-4.
42. Tsaousi G, Kanyambwa D, Pourzitaki C, Vasilakos D. Recurrent episodes of asystolia induced by carotid sinus manipulation during cervical spine surgery without preceding clinical symptoms. *Neurosurgery Quarterly*. 2014;25:1.
43. Huttman D, Cyriac M, Yu W, O'Brien JR. The unusual presentation of a vascular injury after lumbar microdiscectomy: case report. *J Neurosurg Spine*. 2016;24:381-4.
44. Queiroz R. Management of cardiac arrest during neurosurgery in adults. Guidelines for healthcare providers. Resuscitation Council (UK); 2020. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/344713687_Management_of_cardiac_arrest_during_neurosurgery_in_adults_Guidelines_for_healthcare_providers.
45. Reisener MJ, Shue J, Hughes AP, Sama AA, Emerson RG, Guheen C, et al. Hemodynamically significant cardiac arrhythmias during general anesthesia for spine surgery: a case series and literature review. *N Am Spine Soc J*. 2020;2:100010.
46. Anez C, Becerra-Bolaños A, Vives-López A, Rodríguez-Pérez A. Cardiopulmonary resuscitation in the prone position in the operating room or in the intensive care unit: a systematic review. *Anesth Analg*. 2021;132:285-92.
47. Bhatnagar V, Jinjil K, Dwivedi D, Verma R, Tandon U. Cardiopulmonary resuscitation: unusual techniques for unusual situations. *J Emerg Trauma Shock*. 2018;11:31-7.

Infarto agudo al miocardio secundario a trauma

Acute myocardial infarction secondary to trauma

Melissa S. Zelaya-Rodríguez, Kevin I. Villatoro-Guzmán*, Nelson E. García-Álvarez
y Moisés E. Rivera-Sánchez

Departamento de Medicina Interna, Hospital Nacional de San Miguel, San Miguel, San Miguel, El Salvador

Resumen

La lesión cardíaca secundaria a un trauma es un reto diagnóstico debido a su poca incidencia y múltiples presentaciones. El infarto agudo al miocardio secundario a un trauma es una de las complicaciones más raras, cuyo espectro va desde una disección hasta una trombosis de las arterias coronarias, siendo la arteria descendente anterior la principalmente afectada. Se presenta el caso de un paciente de 25 años que consultó en la unidad de emergencia por dolor torácico persistente posterior a un accidente de motocicleta. El electrocardiograma evidenció una elevación del ST en la cara anteroseptal, las enzimas cardíacas estaban elevadas, fue necesario iniciar ventilación mecánica por deterioro respiratorio y se ingresó en la unidad de cuidados intensivos. El ecocardiograma transtorácico evidenció hipocinesia anteroseptal, con una fracción de eyección del ventrículo izquierdo del 33%. Se realizó intervención coronaria percutánea y se encontró oclusión de la descendente anterior del 90%, por lo que se colocó un stent no medicado. El paciente tuvo una evolución favorable y egresó con una notable mejoría de la función cardíaca. La contusión cardíaca debe ser un diagnóstico a considerar en el contexto de un trauma de tórax debido a sus signos inespecíficos; el diagnóstico temprano permite el tratamiento adecuado y mejora el pronóstico.

Palabras clave: Infarto agudo al miocardio. Contusión cardíaca. Trauma cerrado de tórax. Dolor torácico. Inotrópicos.

Abstract

Trauma cardiac injury represents a diagnostic challenge due to its low incidence and multiple presentations. Acute myocardial infarction secondary to trauma is one of the rarest complications, the spectrum ranges from dissection to thrombosis of the coronary arteries, the anterior descending artery being the mainly affected. We present the case of a 25-year-old male patient who consults in the emergency unit due to persistent chest pain after a motorcycle accident. The electrocardiogram showed ST elevation in the anteroseptal aspect accompanied by elevation of cardiac enzymes. It was necessary to start mechanical ventilation due to respiratory deterioration and he was admitted to the intensive care unit. The transthoracic echocardiogram shows anteroseptal hypokinesia with a left ventricular ejection fraction of 33%. Percutaneous coronary intervention was performed, finding 90% anterior descending artery occlusion, by placing a non-medicated stent, with a favorable evolution, and the patient was discharged with a notable improvement in cardiac function. Cardiac contusion should be a diagnosis to consider in the context of chest trauma due to its nonspecific signs; early diagnosis allows adequate treatment and improved prognosis.

Keywords: Acute myocardial infarction. Myocardial contusion. Chest trauma. Chest pain. Inotropes.

*Correspondencia:

Kevin I. Villatoro-Guzmán
E-mail: vg13008@ues.edu.sv

Fecha de recepción: 24-02-2024
Fecha de aceptación: 20-06-2024
DOI: 10.24875/RECC.24000003

Disponible en internet: 02-09-2024
REduCrític. 2024;3(2):98-102
www.reducritic.com

2938-1304 / © 2024 Asociación Salvadoreña de Medicina Crítica y Cuidados Intensivos (ASALMECCI). Publicado por Permanyer. Éste es un artículo open access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

La contusión cardiaca incluye un espectro de patologías que van desde las arritmias transitorias hasta la rotura de la pared cardiaca¹. El trauma cerrado de tórax es la etiología no aterosclerótica del infarto agudo al miocardio (IAM) más rara². La incidencia real de la contusión cardiaca es difícil de estimar y puede variar ampliamente. El diagnóstico puede ser un desafío, en especial por la falta de consenso con respecto a la definición y de un método de referencia para las pruebas de laboratorio. Presentamos el caso de un paciente de 25 años con IAM secundario a un trauma cerrado de tórax.

Caso clínico

Varón de 25 años, sin factores de riesgo cardiovascular, que consulta en la unidad de emergencia por un accidente de tránsito mientras conducía una motocicleta, presentando traumatismo en el tórax anterior y laceraciones en las extremidades superiores. Acusaba dolor torácico de intensidad 6/10 en la escala visual analógica (EVA) de dolor y fue manejado con analgésicos de manera ambulatoria. Posterior a 48 horas de tratamiento brindado, la intensidad del dolor no mejoró, presentando disnea no relacionada con esfuerzos. Consultó en dos ocasiones en un sistema privado de atención de neumología, siendo catalogado como un cuadro de neumonía, se aplicaron beta-2 agonistas inhalados y se continuó manejo ambulatorio con antimicrobianos orales. A las 72 horas posteriores presenta dolor torácico de intensidad 10/10 en la EVA y persiste la disnea, por lo que acude a la unidad de emergencia del sistema público de salud, donde no se encuentran estigmas de trauma en el tórax anterior y es hospitalizado con diagnóstico de neumonía y contusión pulmonar. Durante las primeras 24 horas de ingreso presenta deterioro progresivo, disnea en reposo, ortopnea, dolor torácico 10/10 en la EVA, ingurgitación yugular de grado III, taquicardia, estertores congestivos bilaterales y campo pulmonar derecho hiperventilado, con inestabilidad hemodinámica y requerimiento de aminas vasoactivas; se procede a realizar manejo avanzado de la vía aérea. En el electrocardiograma (ECG) se evidencia elevación del ST de V2 a V6 (Fig. 1). Se administra una dosis de carga de antiagregantes plaquetarios, se realizan rayos X de tórax que muestran edema agudo de pulmón (Fig. 2) y se determinan troponina I de 10,200 ng/ml y péptido natriurético cerebral de 1480 pg/ml. El ecocardiograma reporta una fracción de eyección del

ventrículo izquierdo (FEVI) del 33%, con hipocinesia anteroseptal, vena cava pletórica sin colapso inspiratorio y ultrasonido pulmonar que muestra síndrome intersticial difuso.

El paciente es trasladado a la unidad de cuidados intensivos (UCI), donde se inicia tratamiento de choque cardiogénico con norepinefrina con dosis máxima de 0.35 µg/kg/min, dobutamina con dosis máxima de 10 µg/kg/min, diuréticos intravenosos y ventilación mecánica con protección pulmonar. Se realiza intervencionismo coronario percutáneo (ICP), se cateteriza selectivamente la arteria descendente anterior (ADA), se pasa la guía hacia el segmento distal y se encuentra un trombo en la ADA que ocluye el 90% de la luz del vaso, por lo que se coloca un *stent* no medicado de 2.75 × 12 mm, se insufla a 14 atm por 20 segundos en su tercio proximal, con flujo epicárdico TIMI III posterior a la intervención, sin anomalías en el resto de las arterias coronarias (Fig. 3), con mejoría clínica y del edema pulmonar, pero no de la FEVI. Se inicia el destete ventilatorio y el paciente es extubado de manera electiva a las 48 horas de su ingreso a la UCI. Se realiza resonancia magnética cardiaca 72 horas posterior al ICP, encontrando una FEVI del 19% y territorios de la ADA con leve viabilidad.

El mecanismo que ocasionó la presencia del trombo puede ser explicado por una disección coronaria, pero no es posible confirmarlo mediante ICP, solo mediante una autopsia, de la cual ya existen casos descritos.

Discusión

La contusión cardiaca es un término inespecífico que se utiliza para describir un espectro de lesiones cardiacas no penetrantes que van a ocasionar anomalías en el ECG, elevación de los biomarcadores y anomalías estructurales agudas. Constituye un diagnóstico que no se considera en la valoración inicial del trauma debido a que la atención del médico tratante se dirige a lesiones más evidentes³.

Existen datos limitados acerca de la incidencia de la contusión cardiaca por ser una condición poco abordada en los servicios de emergencia, debido a su presentación clínica inespecífica. Oscila entre el 3% y el 56% de los casos, dependiendo de los criterios diagnósticos utilizados⁴. La mayoría de los pacientes se presentan asintomáticos, pero un porcentaje no establecido presentan muerte súbita y no llegan a la unidad de emergencia⁵. El IAM es una de las complicaciones raras que se logra identificar en los pacientes que son víctimas de accidentes de tránsito, en especial de

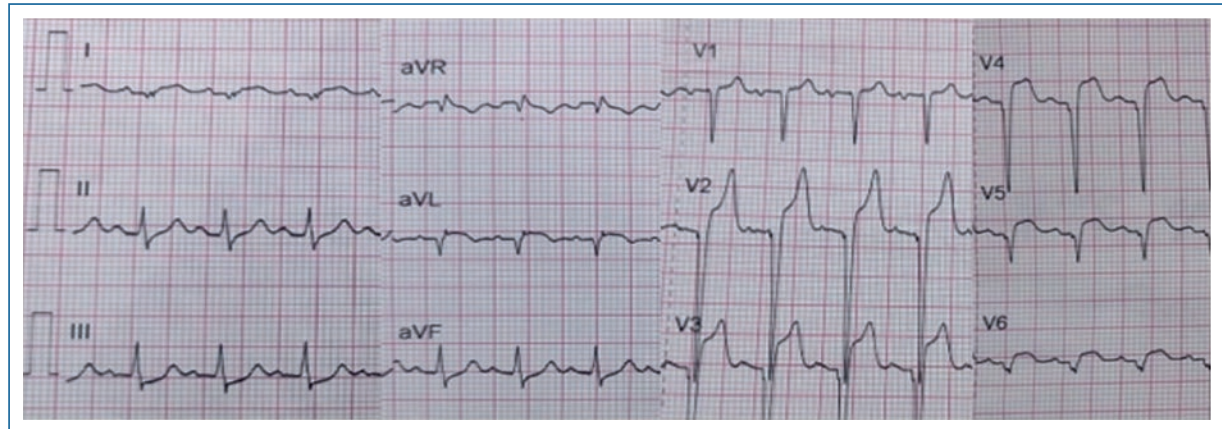


Figura 1. ECG al ingreso, se observa elevación del segmento ST de V2 a V6.



Figura 2. Evolución radiológica. **A:** rayos x de primera evaluación en emergencia. **B:** rayos x de tórax 5 días posterior a accidente. **C:** rayos x de tórax con patrón en alas de mariposa con menos de 24 horas de ingreso.

motocicleta. Las formas de presentación son muy variadas, incluyendo disección, laceración o trombosis de las arterias coronarias, con la ADA como la mayor afectada. Algunos de los mecanismos descritos son la opresión del corazón entre la columna vertebral y el esternón. Además, se observa mayor afección del ventrículo derecho¹, debido a su localización anatómica y su proximidad con la pared anterior del tórax². La evaluación inicial debe incluir un ECG de 12 derivaciones, que en un inicio puede ser normal, por lo que se recomienda la realización de otro ECG de control a las 4 a 6 horas⁶. Puede revelar como hallazgos más frecuentes taquicardia sinusal, bloqueo de rama derecha o elevación y depresión del ST, que no son específicos de una contusión cardíaca⁷. Aproximadamente la mitad de los bloqueos de rama derecha son atribuibles a mecanismos de gran impacto, como accidentes automovilísticos. La lesión más común es la rotura transmural de una cámara cardíaca⁸. La radiografía de tórax

es útil para valorar fracturas asociadas; las fracturas costales, y sobre todo las esternales, deben hacer sospechar la posibilidad de contusión cardíaca⁹. Los signos ecográficos que sugieren una lesión son un movimiento anormal de la pared cardíaca y una disminución de la contractilidad cardíaca. Los niveles de troponina pueden ser útiles en pacientes con anomalías del LMC (lesión miocárdica contundente) y del ECG⁴.

Vásquez et al. realizaron una revisión de 10 estudios prospectivos que involucraron a 1609 pacientes con LMC⁴. Una troponina de alta sensibilidad normal usando un límite de referencia inferior se asoció con un alto valor predictivo negativo para complicaciones cardíacas clínicamente significativas⁴. Se debe priorizar la estabilización hemodinámica y tratar la insuficiencia cardíaca, el shock y las arritmias⁷. Los pacientes pueden ser tratados de forma conservadora o con trombólisis. No obstante, esta última puede estar relacionada con sangrado

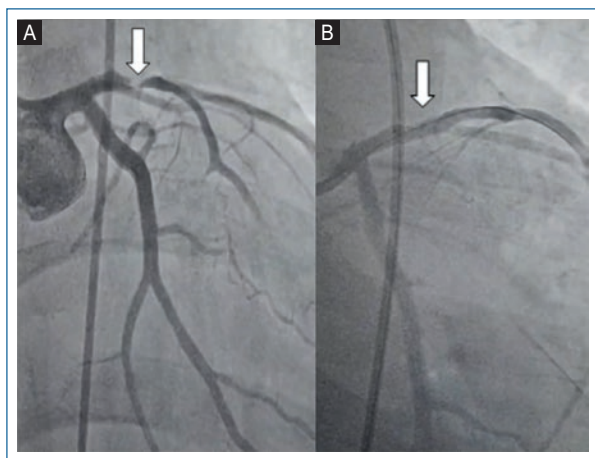


Figura 3. Intervención coronaria percutánea. **A:** coronaria izquierda en proyección anteroposterior en la que se observa un trombo que ocluyó el 90% de la luz del vaso. **B:** proyección anteroposterior caudal posterior a implante Stent no medicado con adecuado flujo distal.

debido a la anticoagulación sistémica en un paciente politraumatizado. En los casos más graves, cuando el tratamiento médico no es suficiente, se deben considerar terapias invasivas, como la ICP con colocación de *stent* o injertos de derivación coronaria¹⁰.

La tasa media de mortalidad de estos pacientes se ha situado en un 7.6% de los casos; el 100% presentaron síntomas de insuficiencia cardíaca⁶. Estos pacientes deben permanecer bajo observación en la UCI durante al menos 24 horas, tiempo durante el cual se desarrollan la mayoría de las complicaciones de la contusión miocárdica⁴.

Conclusión

La contusión cardíaca es una complicación rara del trauma de tórax, con una mayor frecuencia en los accidentes de tránsito en motocicleta. La contusión cardíaca debe ser un diagnóstico considerado y descartado en el área de emergencia ante cualquier paciente que consulte por trauma cerrado de tórax, recordando que el propio trauma puede generar un evento de isquemia miocárdica¹¹, y no solo prestar atención en lesiones más evidentes que comprometan de inmediato la vida del paciente, por lo que se puede retrasar su identificación temprana y manejo, aumentando la mortalidad. El ECG es considerado por muchos autores como el primer eslabón en el algoritmo de abordaje diagnóstico del paciente con trauma cardíaco cerrado. Su importancia radica en su

sensibilidad (47%), especificidad (79%) y alto valor predictivo negativo (> 95%) para descartar una contusión cardíaca¹².

Este caso de un varón de 25 años es un claro ejemplo de que los servicios de salud, tanto públicos como privados, no contemplan el diagnóstico de esta condición de forma sistemática y puede ser confundida con facilidad con otras causas de disnea, con el consiguiente atraso en el diagnóstico y el manejo, impactando en el desenlace, así como en la calidad de vida de los sobrevivientes a dicha patología.

Agradecimientos

Los autores agradecen al paciente por permitirnos incluir sus datos clínicos para la realización de este reporte.

Financiamiento

Los autores declaran que este trabajo se realizó con recursos propios.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Consideraciones éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos. Los autores declaran que han seguido los protocolos de su centro de trabajo sobre la publicación de datos de pacientes.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. Los autores han obtenido el consentimiento informado del paciente referido en el artículo. Este documento obra en poder del autor de correspondencia.

Uso de inteligencia artificial para generar textos. Los autores declaran que no han utilizado ningún tipo de inteligencia artificial generativa en la redacción de este manuscrito ni para la creación de figuras, gráficos, tablas o sus correspondientes pies o leyendas.

Bibliografía

1. Nair L, Winkle B, Senanayake E. Managing blunt cardiac injury. *J Cardiothorac Surg.* 2023;18:71.
2. Alcocer Gamba MA, Maxwell Martínez RL, Gavidia Lugo LM, García Hernández E, Galán Huizar M, Montalvo Ramos A, et al. Infarto agudo del miocardio secundario a trauma cerrado de tórax. *Rev Mex Cardiol.* 2014;25:121-5.

3. Loscalzo J, Fauci AS, Kasper DL, Hauser S, Longo D, Jameson JL, editores. *Harrison's Principles of internal medicine*. 21st ed. New York: McGraw Hill Professional; 2022.
4. Guild CS, deShazo M, Geraci SA. Negative predictive value of cardiac troponin for predicting adverse cardiac events following blunt chest trauma. *Southern Medical Journal*. 2014 Jan;107(1):52-6.
5. Park A, Principe DR. Blunt cardiac injury presenting as a left-sided coronary artery dissection. *J Surg Case Rep*. 2022;2022:rjac008.
6. Symbas PN. Traumatic heart disease. *Curr Probl Cardiol*. 1982; 7:3-35.
7. Pabba K, Widmer RJ, Nguyen V, Martinez MW. Cardiac contusion complicated by heart failure in a young athlete. *JACC Case Rep*. 2022;4: 1124-8.
8. Biondi NL, Bhandari M, Bhyan P. Transient right bundle branch block resulting from a blunt cardiac injury during a motor vehicle accident. *Cureus*. 2020;12:e10534.
9. Galindo Dobón M, Serrano Gállego CA, Busquets Vallbona N, Majó Llopart J. Alteraciones electrocardiográficas en un paciente con traumatismo cardíaco. *Aten Primaria*. 2003;32:496-8.
10. Chan EL, Malik JS, Gomez C. Management of acute coronary syndrome following blunt chest trauma: a case report. *Bull Emerg Trauma*. 2021;9:151-4.
11. ATLS Subcommittee; American College of Surgeons' Committee on Trauma; International ATLS working group. *Advanced Trauma Life Support (ATLS®): the ninth edition*. *J Trauma Acute Care Surg*. 2013;74:1363-6.
12. Alvarado C, Vargas F, Guzmán F, Zárate A, Correa JL, Ramírez A, et al. Trauma cardíaco cerrado. *Rev Colomb Cardiol*. 2014;23:49-58.