

DOI: <https://doi.org/10.5554/22562087.e1150>

Anestésicos volátiles en oxigenadores durante la circulación extracorpórea

Volatile anesthetics in oxygenators during cardiopulmonary bypass

Laura Gutiérrez-Soriano^a ; Juan Carlos Kling-Gómez^a ; Eduardo Becerra-Zapata^b ; Olga Quintero^c; Nicolás Maya-Trujillo^b; Laura Peña-Blanco^b ^aAnestesiología Cardiovascular, Fundación Cardioinfantil. Bogotá, Colombia.^bInvestigación Clínica, Departamento de Anestesiología, Fundación Cardioinfantil. Bogotá, Colombia.^cAnestesiología Cardiovascular, Fundación Santa Fe. Bogotá, Colombia.**Correspondencia:** Fundación Cardioinfantil, calle 163A # 13B-80. Bogotá, Colombia**E-mail:** eduardo.becerra@urosario.edu.co

Resumen

¿Qué sabemos acerca de este problema?

Los anestésicos volátiles se utilizan ampliamente durante la circulación extracorpórea (CEC) debido a sus efectos protectores sobre el miocardio. Sin embargo, sus concentraciones exactas en los gases de barrido y de escape del oxigenador siguen siendo inciertas, lo que puede afectar su eficacia y la exposición ambiental. Estudios previos han evaluado la retención de anestésicos en diferentes oxigenadores, pero hay datos limitados que comparen las concentraciones de anestésicos volátiles en varios tipos de oxigenadores. Es crucial una mejor comprensión de estas diferencias para optimizar el manejo de la anestesia durante la CEC y minimizar el desperdicio de anestésicos.

¿Qué aporta este estudio de nuevo?

Este estudio cuantifica las concentraciones de anestésicos volátiles en los gases de barrido y de escape de tres tipos de oxigenadores durante la CEC. La comparación de estas concentraciones proporciona información sobre la retención de anestésicos y los posibles riesgos de exposición. Los hallazgos ayudan a refinar las estrategias de dosificación de anestésicos, optimizar el manejo de la CEC y contribuir a la seguridad ambiental al reducir el desperdicio de anestésicos. Este estudio llena un vacío crítico de conocimiento, apoyando la toma de decisiones basada en evidencia en las prácticas de perfusión y anestesia.

¿Cómo citar este artículo?

Gutiérrez-Soriano L, Kling-Gómez JC, Becerra-Zapata E, Quintero O, Maya-Trujillo N, Peña-Blanco L. Volatile anesthetics in oxygenators during cardiopulmonary bypass. Colombian Journal of Anesthesiology. 2025;53:e1150.

Introducción: La monitorización continua de las concentraciones exhaladas y los niveles de CO₂ a menudo falta durante la administración de anestésicos inhalados en la circulación extracorpórea (CEC), niveles que se ajustan de manera intermitente basándose en los valores de gases en sangre. Este enfoque no considera las variaciones en los flujos de gas fresco y circulatorio entre las muestras de sangre.

Objetivo: Evaluar el comportamiento de los gases durante la circulación extracorpórea, evaluar la fiabilidad de los datos y analizar los gradientes a través del oxigenador de membrana.

Métodos: Se realizó una monitorización en tiempo real de los anestésicos volátiles inhalados y exhalados, CO₂ y oxígeno en las entradas y salidas del oxigenador durante la CEC. Se incluyeron 70 pacientes adultos sometidos a cirugía cardíaca con CEC para analizar el impacto del flujo circulatorio en diferentes oxigenadores.

Resultados: Se encontró una fuerte correlación entre el CO₂ al final de la espiración y el CO₂ en los gases arteriales (Rho de Spearman = 0,74, p = 0,00). Los gradientes de isoflurano difirieron significativamente entre los oxigenadores Affinity, Fusion y Terumo (p = 0,015). El equilibrio para el isoflurano se alcanzó en 493,90 ± 164,98 segundos (IC 95%: 454-532 segundos). Cuando el flujo circulatorio se redujo a 0,5 L/min, las concentraciones exhaladas aumentaron significativamente (T de Fisher, p = 0,07). El lavado de sevoflurano varió significativamente entre los oxigenadores al inicio de la CEC (media: 117,5 s).

Conclusiones: La monitorización continua de los gases inhalados y exhalados durante la CEC debería ser obligatoria para optimizar la administración de anestésicos y alcanzar las concentraciones plasmáticas deseadas.

Palabras clave: Monitorización de la circulación extracorpórea; Anestesia durante la circulación extracorpórea; Oxigenador de membrana; Anestésicos volátiles; Monitorización en tiempo real.

Read the English version of this article on the journal website www.revcolanest.com.co

Copyright © 2025 Sociedad Colombiana de Anestesiología y Reanimación (S.C.A.R.E.).

Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Abstract

Introduction: Continuous monitoring of exhaled concentrations and CO₂ levels is often lacking during the administration of inhaled anesthetics in cardiopulmonary bypass (CPB), these levels often being adjusted intermittently based on blood gas values. This approach disregards variations in fresh gas and circulatory flows between blood samples.

Objective: To assess gas behavior during bypass circulation, evaluate data reliability, and analyze gradients through the membrane oxygenator.

Methods: Real-time monitoring of inhaled and exhaled volatile anesthetics, CO₂, and oxygen was conducted at the oxygenator inlet and outlet ports during CPB. Seventy adult patients undergoing cardiac surgery on CPB were included in order to analyze the impact of circulatory flow across different oxygenators.

Results: A strong correlation was found between end-tidal CO₂ and arterial blood gas CO₂ (Spearman's Rho = 0.74, p = 0.00). Isoflurane gradients differed significantly among the Affinity, Fusion, and Terumo oxygenators (p = 0.015). Equilibrium for Isoflurane was reached in 493.9 ± 164.98 seconds (95% CI: 454–532 seconds). When circulatory flow was reduced to 0.5 L/min, exhaled concentrations increased significantly (Fisher's T, p = 0.07). Sevoflurane washout varied significantly across oxygenators at CPB initiation (mean: 117.5 s).

Conclusions: Continuous monitoring of inhaled and exhaled gases during CPB should be mandatory to optimize anesthetic delivery and achieve targeted plasma concentrations.

Keywords: Cardiopulmonary bypass monitoring; Anesthesia during bypass; Membrane oxygenator; Volatile anesthetics, Real-time monitoring.

INTRODUCCIÓN

Los anestésicos volátiles se utilizan ampliamente en centros médicos de todo el mundo para mantener las concentraciones anestésicas durante los procedimientos de circulación extracorpórea (CEC). Además de proporcionar anestesia, también tienen propiedades antiinflamatorias. Pueden reducir la liberación de citocinas proinflamatorias, afectar la función de los macrófagos alveolares, proteger contra lesiones miocárdicas inducidas por radicales libres y reducir la captación de neutrófilos y plaquetas en la circulación coronaria. Estos efectos contribuyen a la preservación de la función cardíaca durante la isquemia y la reperfusión, y pueden proporcionar una herramienta valiosa para la prevención y el tratamiento de la disfunción isquémica cardíaca intraoperatoria (1-3).

La farmacocinética de los medicamentos volátiles durante la CEC está influenciada por tres factores principales: alteraciones en el coeficiente de partición sangre/gas, cambios en la solubilidad tisular y el diseño del oxigenador (4). El diseño del oxigenador tiene un efecto sustancial en la absorción y eliminación de estos gases durante la anestesia. Actuando como un reservorio para los anestésicos volátiles, el oxigenador impide

su paso y las diferentes marcas dan lugar a distintos comportamientos de difusión de gases. Este efecto se crea mediante el intercambio de gases a través de membranas de PMP, que imitan el proceso natural de difusión de gases a través de membranas celulares permeables a los gases. En este proceso, la transferencia de gases dentro de la capa sólida depende de los gradientes de presión parcial y las propiedades específicas de permeabilidad de la membrana (5). Además, las variaciones en el flujo de gas fresco y la temperatura afectan la captación y eliminación de anestésicos (6).

Durante la CEC y la anestesia cardiovascular, la hipotermia no solo reduce la necesidad de anestésicos, sino que también afecta la precisión de los métodos de monitorización de la profundidad de la anestesia, como el índice bispectral (BIS), que ha mostrado una variabilidad significativa. En algunos casos, el patrón electroencefalográfico (EEG) puede indicar una sedación leve, mientras que los indicadores clínicos de la profundidad de la anestesia pueden sugerir un nivel de inconsciencia más profundo (7).

La monitorización continua de los gases inhalados y exhalados durante la CEC es necesaria para mantener concentraciones adecuadas y evitar niveles insuficientes de

anestésicos volátiles que podrían aumentar el riesgo de consciencia intraoperatoria. Se recomienda instalar un sistema de recogida de gases en la salida del oxigenador para monitorizar todos los gases entrantes y salientes cuando se utiliza un sistema de suministro de anestésicos volátiles. Esto permite rastrear y ajustar los niveles de dióxido de carbono, de acuerdo con los estándares de seguridad de la anestesia (4,8,9).

Se han realizado varios estudios in vivo e in vitro para medir las concentraciones plasmáticas secuenciales de anestésicos inhalados. Sin embargo, la medición rutinaria durante la cirugía no es factible debido a problemas de reproducibilidad. Se requiere un muestreo adecuado bajo condiciones de temperatura controlada y acceso inmediato a instalaciones de laboratorio para estas mediciones (4,5).

Es importante comprender el comportamiento de los anestésicos inhalados durante la CEC para determinar las concentraciones correctas de anestésicos inhalados y evaluar su impacto en la transferencia de otros gases. Algunos fabricantes recomiendan ajustar la fracción de oxígeno inspirado y el flujo de gas fresco para concentraciones de isoflurano del 1,3% y sevoflurano del 2,6%, respectivamente, para lograr el

rendimiento deseado de transferencia de gases (10).

Por lo tanto, en este estudio, se realizaron mediciones in vivo durante la CEC para determinar el comportamiento de los gases inhalados y exhalados a través de la membrana del oxigenador. Se emplearon líneas de muestreo tanto en la entrada como en la salida del oxigenador. Esto se hizo para asegurar la fiabilidad y consistencia de los datos, adecuándolos para la monitorización rutinaria de gases inhalados y exhalados, como oxígeno, dióxido de carbono, sevoflurano e isoflurano, durante el curso de la CEC. Esta técnica de monitorización es de particular relevancia durante esta fase quirúrgica, ya que ayuda a evaluar la profundidad de la anestesia de acuerdo con los indicadores clínicos.

MÉTODOS

Diseño del estudio

Este estudio observacional prospectivo se llevó a cabo en la Fundación Cardioinfantil,

en Bogotá, Colombia. Se incluyeron pacientes adultos sometidos a cirugía cardiaca con CEC utilizando oxigenadores de membrana Medtronic Fusion, Affinity o Terumo. El estudio fue aprobado por el Comité de Ética e Investigación 15-2017, 3 de mayo de 2017, y clasificado como “investigación de riesgo mínimo”, según el artículo 11, Resolución 008430 de 1993 de la Ley General de Salud sobre Investigación en Salud. Basado en la naturaleza de riesgo mínimo del proyecto de investigación y la ausencia de cambios en el comportamiento del paciente, no se requirió consentimiento informado por escrito.

Participantes

Se incluyeron 70 pacientes adultos en el estudio. Se excluyeron los pacientes que tenían una contraindicación para los anestésicos volátiles o cuando no se utilizó el oxigenador de membrana durante la cirugía.

El tamaño de la muestra se calculó para un margen de error del 5%, un intervalo de confianza del 95% y una varianza de 400, basada en una desviación estándar de +/-

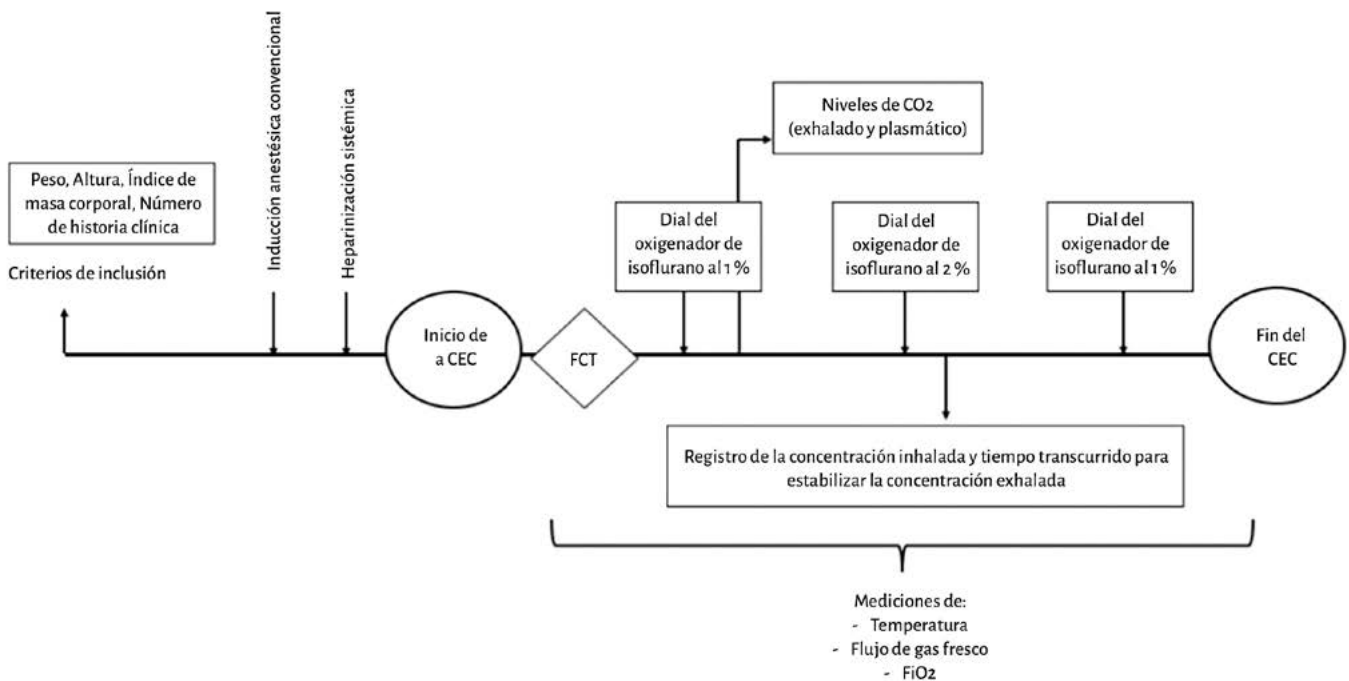
20% para el isoflurano capturado por los oxigenadores de membrana.

Se hicieron esfuerzos para manejar los datos faltantes, incluyendo un protocolo estructurado para la monitorización y registro de gases en tiempo real. En aquellos casos en los que faltaban puntos de datos debido a fallos del equipo o errores de registro, no se imputaron valores faltantes y solo se analizaron los casos completos.

Manejo anestésico

Todos los pacientes recibieron una inducción anestésica balanceada convencional con sevoflurano, manteniendo una concentración exhalada del 2,5% hasta el inicio de la CEC. Al iniciar la CEC, se administró isoflurano al 1%, con monitorización continua en tiempo real de las concentraciones en las ramas inspiratoria y espiratoria del oxigenador. Los vaporizadores de isoflurano TEC7 se calibraron antes del estudio y se monitorizaron utilizando un analizador de gases General Electric CareScape Monitor B650. Se puede evidenciar la línea del tiempo de los eventos en la [Figura 1](#).

Figura 1. Línea de tiempo de los eventos.



Fuente: Autores.

Los siguientes oxigenadores de membrana se utilizaron durante la circulación extracorpórea: 1) Terumo Capiiox RX25 (fibras huecas de polipropileno microporoso, superficie de membrana de 2,5 m², tasa de flujo recomendada de 0,5-7,0 L/min, capacidad del reservorio de 4.000 mL); 2) Affinity NT™ (fibras huecas de polipropileno microporoso, superficie de membrana de 2,5 m², tasa de flujo sanguíneo recomendada de 1-7 L/min, capacidad del reservorio de 4.000 mL); 3) Affinity Fusion (fibra hueca de polipropileno microporoso, superficie de membrana de 2,5 m², tasa de flujo recomendada de 1-7 L/min, capacidad del reservorio de 4.500 mL).

Resultados medidos

Las variables de resultado primarias incluyeron: 1) concentraciones inhaladas y exhaladas en tiempo real de anestésicos volátiles; 2) niveles de CO₂ y oxígeno en las entradas y salidas del oxigenador, y 3) flujo circulatorio, temperatura y muestras de gases arteriales para evaluar la dinámica de transferencia de gases.

El estudio registró la disminución de las concentraciones exhaladas de sevoflurano desde el inicio de la CEC hasta que se alcanzó el 0,5%, junto con el tiempo requerido para estos cambios. También se monitorearon los ajustes de concentración de isoflurano (aumentando al 2% y luego reduciendo al 1%), con registros de tiempo para cada transición. Las mediciones en línea de la fracción de oxígeno inspirado y dióxido de carbono se compararon con los resultados de las muestras de gases arteriales. Los valores se analizaron en relación con la temperatura, el tiempo en CEC y los efectos del flujo de la máquina en las mediciones.

Análisis estadístico

Las variables continuas se resumieron como medias (DE) o medianas (IQR) según su distribución. Las diferencias entre los tipos de oxigenadores se evaluaron utilizando la

prueba H de Kruskal-Wallis para comparaciones no paramétricas y ANOVA de una vía para variables distribuidas normalmente. Las comparaciones post hoc por pares se realizaron utilizando la prueba de Dunn o la prueba HSD de Tukey. Se utilizaron coeficientes de correlación de Spearman para evaluar las relaciones entre el CO₂ exhalado y los niveles de CO₂ en gases arteriales. Las figuras se crearon utilizando ggplot2 y se exportaron para su publicación.

RESULTADOS

Se incluyeron 70 pacientes en el estudio; el 75,7% (n = 53) eran hombres y el 24,3% (n = 17) eran mujeres, con un rango de edad entre 18 y 82 años (media: 62,5). La mayoría de los pacientes (68,9%) se sometieron a un solo procedimiento, mientras que el 22,9% y el 71,1% tuvieron dos y tres procedimientos combinados, respectivamente, el 71,1% tuvo tres combinados y, por último, el 1,4% se sometió a más de tres procedimientos.

Los procedimientos incluyeron tanto cirugías combinadas como únicas; la revascularización miocárdica fue la más frecuente, seguida del reemplazo de la válvula aórtica

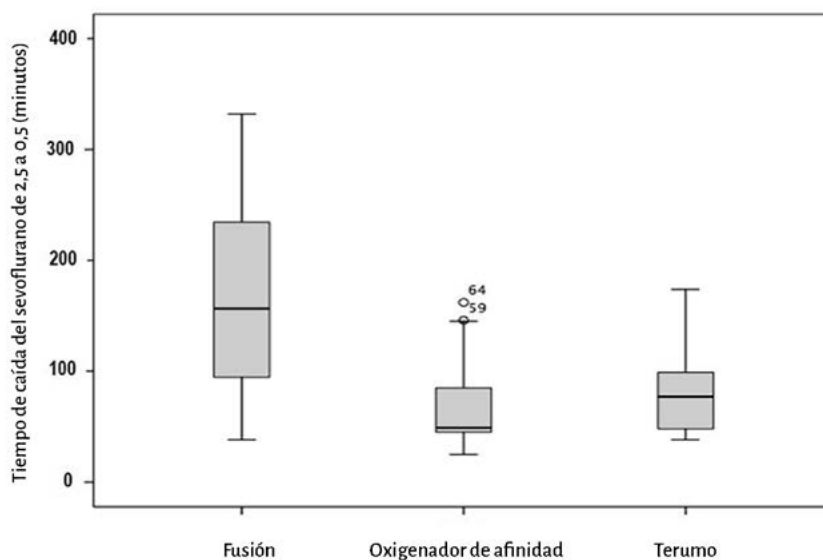
y el reemplazo de la válvula mitral. La marca de oxigenador más comúnmente utilizada durante la CEC fue el Medtronic Fusion (n = 48 pacientes, 68,6%), seguido por Affinity (n = 17 pacientes, 24,3%) y Terumo (n = 5 pacientes, 7,1%).

El tiempo de exposición al sevoflurano desde el inicio del procedimiento anestésico hasta el inicio de la CEC mostró una distribución anormal debido a los diferentes procedimientos involucrados, con un tiempo medio de 150 minutos (rango: 210 minutos; 75-285 minutos).

Cuando se suspendió el sevoflurano al inicio de la CEC, el tiempo medio requerido para que la concentración exhalada del mismo medicamento disminuyera al 0,5% mientras se mantenía un flujo estable en la CEC fue de 117,5 minutos (rango: 307, 25-332 minutos). No hubo diferencias significativas entre la duración de la exposición al sevoflurano y el tiempo para alcanzar una concentración exhalada del 0,5% (Rho de Spearman = 0,064, p = 0,59).

Se observó una diferencia entre los oxigenadores en cuanto al tiempo entre el cierre del vaporizador y alcanzar una concentración exhalada del 0,5% (Kruskal-Wallis H, p = 0,01, [Figura 2](#)). Un análisis post hoc reveló que el tiempo necesario para que la concentración exhalada de sevoflurano dis-

Figura 2. Tiempo de caída del sevoflurano por oxigenador.



Fuente: Autores.

minuyera al usar el oxigenador Fusion fue mayor que el necesario para el oxigenador Affinity ($p = 0,01$) y el oxigenador Terumo ($p = 0,041$). Sin embargo, no hubo diferencia en el tiempo necesario para que la concentración exhalada de sevoflurano alcanzara el 0,5% entre los oxigenadores Affinity y Terumo ($p = 0,48$), y no se encontró correlación entre la superficie corporal del paciente y el tiempo necesario para que los niveles de sevoflurano disminuyeran ($p = 0,97$).

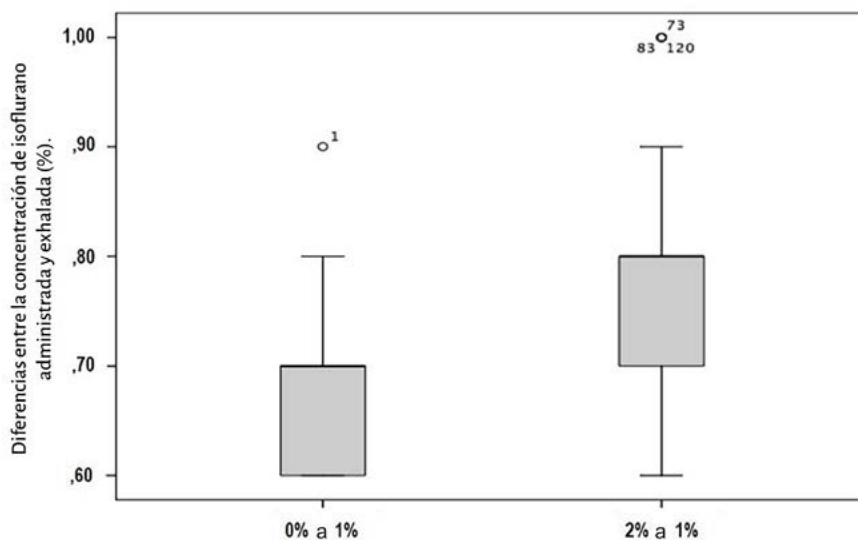
El tiempo medio requerido para que la concentración exhalada se estabilizara cuando se administró isoflurano al 1% al inicio de la CEC fue de 493,3 segundos (DE +/-164,98 s, IC 95% 454-532 s). Las comparaciones entre oxigenadores no revelaron diferencias importantes al comparar los tiempos medios de los oxigenadores utilizando ANOVA de una vía y distribuciones normales de variables ($p = 0,12$).

El tiempo requerido para equilibrar la concentración de isoflurano al cambiar el dial del vaporizador del 1% al 2% fue, en promedio, de 448,5 s (DE +/- 18,6; IC 95% 411,33-485,67 s), sin diferencias entre los oxigenadores ($p = 0,106$). El tiempo medio para equilibrar la concentración de isoflurano al volver a cambiar el dial del vaporizador del 2% al 1% fue de 431,2 s, con diferencias entre los oxigenadores ($p = 0,139$). No se encontró diferencia en el tiempo requerido para equilibrar la concentración de isoflurano entre 0% y 1% o entre 1% y 2% ($p = 0,083$).

La prueba de Kruskal-Wallis se utilizó para determinar si había una diferencia entre las concentraciones de isoflurano administradas y exhaladas con el dial del vaporizador al 1% al inicio de la CEC según el tipo de oxigenador utilizado, revelando una diferencia significativa entre los grupos ($p = 0,015$).

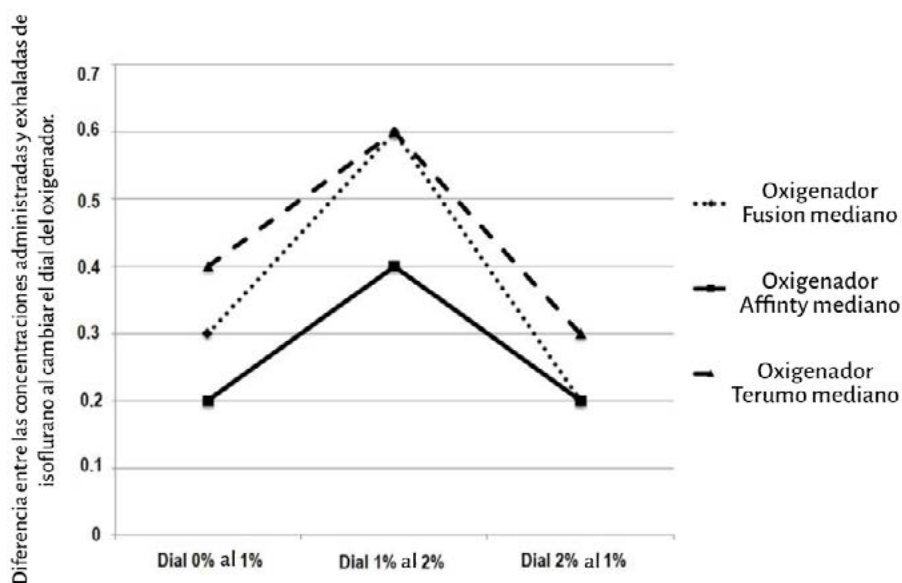
Hubo una mayor diferencia entre la concentración administrada menos la concentración exhalada al usar el oxigenador Fusion en comparación con el oxigenador Affinity ($p = 0,035$). Un resultado similar se encontró para el oxigenador Terumo en comparación con el Affinity ($p = 0,013$). Sin embargo, no hubo diferencia significativa entre los oxigenadores Terumo y Fusion ($p = 0,082$). La diferencia entre las concentraciones administradas y exhaladas también fue significativa al cambiar el dial del 0% al

Figura 3. Diferencia entre las concentraciones administradas y exhaladas de isoflurano.



Fuente: Autores.

Figura 4. Diferencia entre las concentraciones administradas y exhaladas de isoflurano al cambiar el dial del oxigenador del 2% al 1%.



Fuente: Autores.

1%, en comparación con cambiarlo del 2% al 1% ($p = 0,00$) (Figura 3) y entre los oxigenadores al cambiar el dial del vaporizador del 1% al 2% ($p = 0,007$) y del 2% al 1% ($p = 0,029$) (Figuras 3 y 4).

En cuanto al comportamiento del CO₂, se encontró una fuerte correlación entre el

CO₂ exhalado y los niveles de CO₂ en gases arteriales (Rho de Spearman 0,74, $p < 0,0001$). Al analizar por tipo de oxigenador, esta correlación se mantuvo fuerte para tres de los cuatro oxigenadores, tanto el Medtronic como el Fusion (Rho de Spearman 0,85, $p < 0,0001$), y el Affinity (Rho de

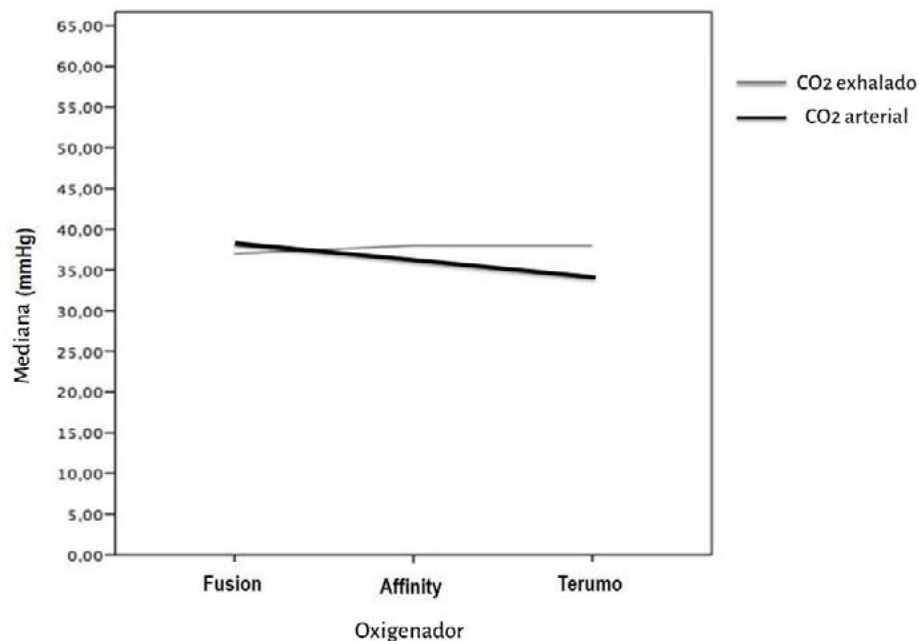
Spearman 0,81, $p < 0,0001$). Sin embargo, para el oxigenador Terumo, la correlación fue más débil y no estadísticamente significativa (Rho de Spearman 0,61, $p = 0,27$). La posterior estratificación por grupo de muestra de gas mostró una correlación más fuerte para el primer grupo de muestras (Figura 5).

La fracción inspirada de oxígeno media durante la CEC fue del 88% (rango: 73-99%), mientras que la fracción exhalada de oxígeno media fue del 79% (rango: 64-92%). La diferencia entre las fracciones de oxígeno inspiradas y exhaladas se analizó por separado, revelando una diferencia media del 7% (Figura 6). Se encontró que esta diferencia cambiaba entre la primera y la segunda muestra de gas arterial ($p = 0,014$), lo que llevó a una exploración adicional de las diferencias a lo largo del tiempo. Al comparar la diferencia media en las fracciones de oxígeno inspiradas menos exhaladas a lo largo del tiempo, se observaron mayores discrepancias durante los primeros 40 minutos de la CEC (Mann-Whitney U, $p = 0,005$) (Figura 7).

DISCUSIÓN

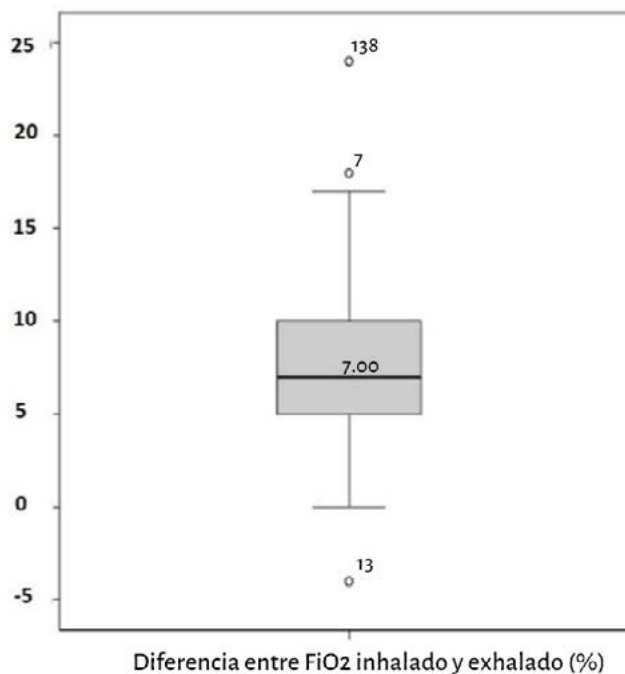
Con el tiempo, la monitorización de la anestesia intraoperatoria ha aumentado para garantizar una atención óptima durante la cirugía. Sin embargo, en la cirugía cardiovascular, cuando se inicia la CEC, la monitorización de los gases halogenados se suspende, mientras que la monitorización del oxígeno y el CO₂ continúa de manera intermitente a intervalos regulares. Considerando que la CEC es una parte integral del procedimiento anestésico, se vuelve esencial asegurar niveles terapéuticos para una profundidad anestésica adecuada, analgesia y relajación neuromuscular. Por lo tanto, es crucial mantener la monitorización durante el proceso de CEC. De hecho, en caso de fugas en la rama inspiratoria, sería el método más temprano y agudo para identificar cualquier problema de oxigenación.

Figura 5. Correlación entre el CO₂ exhalado y los niveles de CO₂ en gases arteriales por tipo de oxigenador.



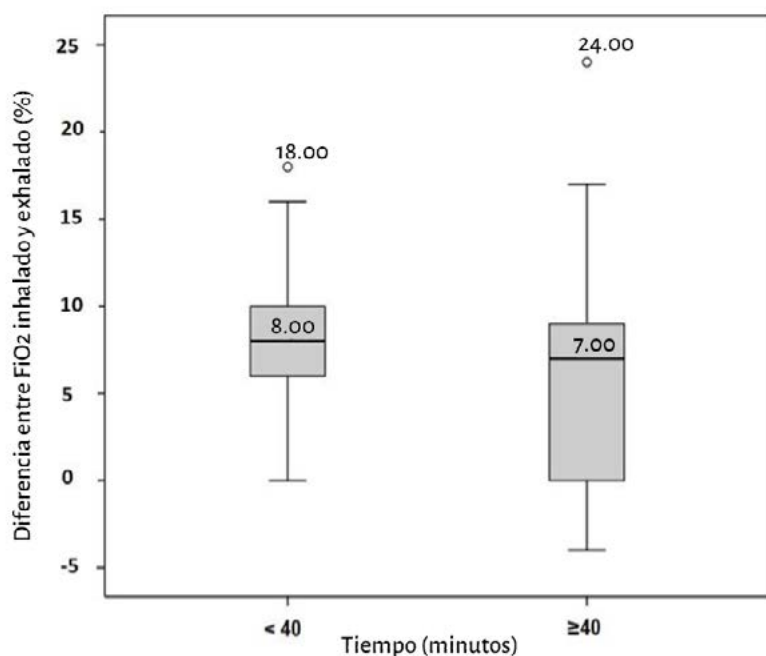
Fuente: Autores.

Figura 6. Diferencia media entre las fracciones de oxígeno inspiradas y exhaladas a lo largo del tiempo.



Fuente: Autores.

Figura 7. Discrepancias en las fracciones de oxígeno inspiradas menos exhaladas durante los primeros 40 minutos de la circulación extracorpórea.



Fuente: Autores.

Según los Estándares y directrices para la práctica de perfusión, se recomienda usar un analizador de oxígeno en línea en la unión entre la línea de entrada de la fuente de oxígeno y la conexión al oxigenador. Sin embargo, una limitación de esta configuración es la colocación del analizador de oxígeno aguas arriba del oxigenador (8), lo que significa que un déficit de oxígeno en la región aguas abajo puede pasar desapercibido hasta que la saturación arterial del paciente comience a disminuir. Para abordar este problema, autores como Srey et al. (11) y Caruso et al. (13) sugieren monitorizar la fracción de oxígeno exhalado (FEO₂) que sale a través del puerto de escape del oxigenador utilizando un conector adjunto al puerto; esto permite la detección temprana y aguda de problemas de oxigenación y fugas en la rama inspiratoria. Sin embargo, la monitorización de la FEO₂ por sí sola es insuficiente para validar la configuración de la fracción de oxígeno inspirada (FIO₂) en los mezcladores de gas. Para asegurar una regulación y verificación precisas de la FIO₂,

es necesario el uso de un analizador de O₂ independiente como medio para confirmar que el gas oxigenado ha pasado a través del oxigenador y que la FIO₂ es proporcional a la configuración del mezclador. Por otro lado, las mediciones en línea de CO₂ permiten ajustes tempranos de los flujos de gas inspirados para lograr los valores deseados antes de tomar las primeras muestras de gases en sangre.

La eficiencia de la transferencia de gases a través de la membrana del oxigenador es altamente sensible a los cambios en el flujo de la máquina. Esta rápida transferencia de gases a través de la membrana conduce a una caída inmediata en las concentraciones de gases halogenados después de cerrar el vaporizador al inicio de la CEC, exponiendo al paciente a niveles por debajo de la concentración alveolar mínima (MAC) y aumentando el riesgo de recuerdo intraoperatorio. Por lo tanto, la administración temprana de gases halogenados es crucial para mantener la eficacia terapéutica. El tiempo requerido para lograr el equi-

librio de gases halogenados en el paciente puede variar significativamente debido a las variaciones en los compartimentos de distribución. Esta imprevisibilidad requiere una monitorización constante para evitar exponer al paciente a eventos de recuerdo intraoperatorio.

Nuestro estudio reveló una diferencia significativa entre las concentraciones inspiradas y exhaladas de gases halogenados. Esta diferencia puede atribuirse no solo a la retención por los tejidos una vez que el cuerpo se satura, sino también a la influencia del material de la membrana del oxigenador. Estos hallazgos están respaldados por investigaciones previas de Wiesenack, quien demostró que la captación y eliminación de isoflurano se reducen significativamente con la nueva membrana de PMP hermética al plasma en comparación con las membranas de PPL convencionales. Según este modelo, una posible explicación para la captación extremadamente reducida de isoflurano por los oxigenadores de membrana de difusión es un coeficiente de difusión muy bajo del isoflurano en la capa sólida de la nueva membrana debido a su tamaño molecular.

Cuando el dial del vaporizador se devolvió al 1%, las concentraciones exhaladas fueron más altas que las concentraciones iniciales. Esto se debe a que el aumento previo en la concentración al 2% satura los tejidos, lo que lleva a un retraso en el tiempo de eliminación y una estabilización más lenta.

Las diferencias entre la fracción seleccionada de oxígeno inspirado y el valor inspirado real pueden atribuirse a la falta de precisión del dial, donde ligeras variaciones pueden resultar en un cambio del 1% o 2%. Por lo tanto, la monitorización en línea es necesaria para establecer la concentración exacta.

Este estudio reveló una fuerte correlación positiva entre el CO₂ exhalado y el CO₂ arterial medido en muestras de gases arteriales durante la CEC. Los hallazgos aquí documentados coinciden con los de Zia et al. (14), quienes también identificaron una relación significativa entre el CO₂ arterial medido por un analizador de gases

en sangre y el CO₂ arterial determinado por capnografía del escape del oxigenador. También se observó una correlación débil, pero estadísticamente significativa, y positiva entre la temperatura medida en el momento en que se tomaron los gases y el CO₂ medido en la rama espiratoria del sistema. Este resultado respalda el estudio de Potger et al. (15), quienes encontraron una correlación razonable entre el PECO₂ y el CO₂ corregido por temperatura en todas las fases de la CEC.

Además, los resultados mostraron una correlación negativa moderada entre la temperatura en el momento del muestreo de gases arteriales y el delta de CO₂ (concentración de CO₂ arterial menos concentración de CO₂ exhalado). Estos hallazgos también están respaldados por la literatura, como es el caso de los estudios de Baraka et al. (16) y Graham et al. (17). Este último identificó una buena concordancia entre las tensiones de CO₂ arterial y de escape durante la CEC, particularmente bajo condiciones normotérmicas e hipotermia estable. Los hallazgos presentados en este trabajo coinciden con los de estudios previos y respaldan el uso del CO₂ exhalado para indicar de manera confiable el CO₂ arterial durante la CEC. Además, este estudio destaca la importancia de considerar la temperatura al interpretar los resultados de la capnografía del escape del oxigenador, con el fin de mejorar el control del CO₂ arterial y optimizar los resultados clínicos.

Durante la CEC, la condensación liberada por el oxigenador a través del intercambiador de calor lleva a la saturación del filtro de medición de gas exhalado, lo que resulta en una disminución de la sensibilidad durante las mediciones exhaladas y aumentos en los gradientes. Para mantener mediciones confiables, se recomienda colocar una trampa de agua en el filtro de la rama espiratoria o cambiar el filtro después de la primera hora de CEC.

El aumento en los gases halogenados exhalados al reducir el flujo de la máquina al 50% se explica fisiológicamente por la disminución en la velocidad del flujo sanguíneo a través de la membrana. Esto

disminuye el gradiente entre los gases halogenados inspirados y los presentes en la sangre, permitiendo que la rama exhalada registre una concentración más alta, más cercana al valor inspirado. Por el contrario, los flujos altos causan un paso rápido de la sangre, aumentando así el gradiente y resultando en valores medidos más bajos en la rama exhalada. Por lo tanto, todas las mediciones se realizaron con flujo sanguíneo total para cada paciente.

La investigación actual tiene limitaciones notables que merecen consideración. Una de estas limitaciones está asociada con el mecanismo de medición empleado. Este aparato fue diseñado y fabricado a medida por los propios investigadores, y originalmente no estaba destinado a mediciones de concentración altamente precisas. Además, el dial utilizado para establecer la concentración deseada carece de un alto grado de precisión. Como se señaló, incluso pequeñas fluctuaciones pueden producir cambios de aproximadamente 1% a 2%. En consecuencia, para lograr concentraciones precisas, es imperativo realizar una monitorización continua en tiempo real. También es importante subrayar el desafío planteado por la disparidad en los tipos de oxigenadores utilizados y la tarea compleja de comparar mecanismos tan dispares. En este estudio, la amplia gama de pesos corporales de los pacientes potencialmente afectó la absorción del anestésico durante la CEC. Sin embargo, se abordó este problema utilizando oxigenadores de membrana de diferentes tamaños adaptados al peso individual de cada paciente. Esta limitación subraya la necesidad de implementar medidas complementarias, como la monitorización continua, para garantizar la precisión y fiabilidad de los hallazgos derivados de este estudio.

CONCLUSIÓN

En resumen, esta investigación destaca la importancia de la monitorización continua debido a la variabilidad en el tiempo requerido para la estabilización de gases haloge-

nados y las diferencias significativas entre las concentraciones de gases halogenados inspirados y exhalados. Aunque la farmacocinética y farmacodinámica de los anestésicos inhalados están bien comprendidas, es importante considerar que varios factores pueden afectar estos comportamientos, como la retención del anestésico en los tejidos y la capacidad de difusión de los anestésicos según el material y la composición de cada membrana. Esta variabilidad podría deberse a la retención en la membrana del oxigenador, que puede estar influenciada por la eficiencia de la transferencia de gases y la sensibilidad a los cambios en el flujo de la máquina. En consecuencia, estas variaciones aumentan el riesgo de encontrar concentraciones subterapéuticas de gases halogenados, aumentando así el potencial de eventos de recuerdo intraoperatorio.

DECLARACIONES ÉTICAS

Aprobación del comité de ética

El estudio fue aprobado por el Comité de Ética e Investigación 15-2017, del 3 de mayo de 2017.

El protocolo fue presentado al Comité de Ética de la Fundación Cardioinfantil para su evaluación y aprobación.

Protección de sujetos humanos y animales

Los autores declaran que no se realizaron experimentos en humanos o animales para este estudio. Los autores declaran que los procedimientos seguidos estuvieron de acuerdo con las regulaciones del comité de ética de investigación clínica relevante y con las del Código de Ética de la Asociación Médica Mundial (Declaración de Helsinki).

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 declaran que no aparecen datos de pacientes en este artículo. No se requirió del consentimiento informado escrito por parte de los pacientes debido a la naturaleza de riesgo mínimo del proyecto de investigación y la ausencia de cambios en el comportamiento del paciente, no se requirió consentimiento informado por escrito.

RECONOCIMIENTOS

Contribuciones de los autores

LG: Conceptualización, desarrollo de la idea e hipótesis, formulación de los objetivos de la investigación. Investigación y experimentos.

JK: Metodología, diseño de la metodología, desarrollo del proceso seguido. Verificación de resultados del estudio, experimentos y datos, supervisión, liderazgo de la investigación, mentoría y supervisión del proyecto.

EB: Curación de datos, gestión y mantenimiento de datos de investigación, incluyendo limpieza de datos. Redacción de la versión inicial del manuscrito. Revisión, edición y aprobación de la versión final.

OQ: Conceptualización, desarrollo de la idea e hipótesis.

NM: Redacción de la versión inicial del manuscrito.

LP: Visualización, creación de gráficos, y figuras.

Asistencia para el estudio

Ninguna declarada.

Apoyo financiero y patrocinio

Ninguno declarado.

Conflictos de interés

Ninguno declarado.

Presentaciones

Ninguna declarada.

Agradecimientos

Ninguno declarado.

REFERENCIAS

- Philipp A, Wiesenack C, Behr R, Schmid FX, Birnbaum DE. High risk of intraoperative awareness during cardiopulmonary bypass with isoflurane administration via diffusion membrane oxygenators. *Perfusion*. 2002;17(3):175-8. <https://doi.org/10.1191/0267659102pf5660a>
- Nigro Neto C, Tardelli MA, Paulista PH. Uso de anestésicos halogenados en la circulación extracorpórea. *Rev Bras Anesthesiol*. 2012;62(3):346-55. [https://doi.org/10.1016/S0034-7094\(12\)70135-6](https://doi.org/10.1016/S0034-7094(12)70135-6)
- Wartier DC, Laffey JG, Boylan JF, Cheng DCH. The systemic inflammatory response to cardiac surgery. *Anesthesiology*. 2002;97(1):215-52. <https://doi.org/10.1097/00000542-200207000-00030>
- Barry AE, Chaney MA, London MJ. Anesthetic management during cardiopulmonary bypass: A systematic review. *Anesth Analg*. 2015;120(4):749-69. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000000612>
- Wiesenack C, Wiesner G, Keyl C, et al. In vivo uptake and elimination of isoflurane by different membrane oxygenators during cardiopulmonary bypass. *Anesthesiology*. 2002;97(1):133-8. <https://doi.org/10.1097/00000542-200207000-00019>
- Henderson JM, Nathan HJ, Lalande M, Winkler MH, Dub LM. Washin and washout of isoflurane during cardiopulmonary bypass. *Can J Anaesth*. 1988;35(6):587-90. <https://doi.org/10.1007/BF03020345>
- Doi M, Gajraj RJ, Mantzaridis H, Kenny GN. Effects of cardiopulmonary bypass and hypothermia on electroencephalographic variables. *Anesthesia*. 1997;52(11):1048-55. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2044.1997.229-az0364.x>
- AmSECT. Standards and Guidelines for Perfusion Practice 2023 [citado: 2023 jun 20]. Disponible en: <https://www.amsect.org/Policy-Practice/AmSECTs-Standards-and-Guidelines>.
- Kunst G, Milojevic M, Boer C, et al. 2019 eacts/EACTA/EBCP guidelines on cardiopulmonary bypass in adult cardiac surgery. *Br J Anaesth*. 2019;123(6):713-57. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2019.09.012>
- Medtronic. Affinity Fusion® Oxygenator [Internet]. [citado: 2017 jul]. Disponible en: <https://europe.medtronic.com/xden/health-careprofessionals/products/cardiovascular/cardiopulmonary/affinity-fusion-oxygenation-system.html>.
- Nigro Neto C, Landoni G, Cassar L, et al. Use of volatile anesthetics during cardiopulmonary bypass: A systematic review of adverse events. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2014;28(1):84-9. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2013.05.030>
- Srey R, Rance G, Handrahan J, Smith T, Leissner KB, Zenati MA. Fraction of expired oxygen: An additional safety approach to monitor oxygen delivery to the Heart Lung Machine Oxygenator. *Perfusion*. 2021;37(4):331-3. <https://doi.org/10.1177/02676591211001594>
- Caruso LJ, Gravenstein N, Janelle GM, Gabrielli A. Detection of oxygen delivery failure during cardiopulmonary bypass: An even earlier warning technique. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2002;16(6):789. [https://doi.org/10.1016/S1053-0770\(02\)90000-1](https://doi.org/10.1016/S1053-0770(02)90000-1)
- Zia M, Davies FW, Alston RP. Oxygenator exhaust capnography. A method of estimating arterial carbon dioxide tension during CPB. *JCAVA*. 1992;6:42-5. [https://doi.org/10.1016/1053-0770\(91\)90043-5](https://doi.org/10.1016/1053-0770(91)90043-5)
- Potger KC, McMillan D, Southwell J, Dando H, O'Shaughnessy K. Membrane oxygenator exhaust capnography for continuously estimating arterial carbon dioxide tension during cardiopulmonary bypass. *J Extra Corpor Technol*. 2003;35(3):218-23. <https://doi.org/10.1051/ject/2003353218>
- Baraka A, El-Khatib M, Muallem E, Jamal S, Haroun-Bizri S, Aouad M. Oxygenator exhaust capnography for prediction of arterial carbon dioxide tension during hypothermic cardiopulmonary bypass. *J Extra Corpor Technol*. 2005;37:192-5. <https://doi.org/10.1051/ject/200537192>
- Graham JM, Gibbs NM, Weightman WM, Sheminant MR. The relationship between oxygenator exhaust PCO₂ and arterial PCO₂ during hypothermic cardiopulmonary bypass. *Anaesth Intensive Care*. 2005;33:457-61. <https://doi.org/10.1177/0310057X0503300406>