

4. Seguridad y prevención de complicaciones durante el soporte ECMO

SAFETY AND PREVENTION OF COMPLICATIONS DURING ECMO SUPPORT

Alicia Rascón López

Enfermera titulada en la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona.

RESUMEN

La oxigenación por membrana extracorpórea (ECMO) se ha consolidado como una herramienta fundamental en el manejo de pacientes críticos con insuficiencia respiratoria o cardíaca grave, ofreciendo soporte vital temporal mientras se trata la causa subyacente. Sin embargo, al tratarse de una técnica compleja e invasiva, el manejo seguro del ECMO requiere la implementación de estrategias efectivas de prevención de complicaciones y un enfoque integral centrado en el paciente. Este trabajo destaca la importancia del rol del enfermero perfusionista, cuyo desempeño abarca tanto la supervisión técnica del circuito extracorpóreo como la vigilancia continua del estado clínico del paciente, asegurando la coordinación eficiente del equipo multidisciplinario. Se describen las complicaciones más frecuentes asociadas al ECMO, como eventos hemorrágicos, tromboticos, infecciosos, mecánicos y neurológicos, y se presentan estrategias de prevención que incluyen selección adecuada del paciente, monitoreo constante, cumplimiento de protocolos estandarizados y formación continua del personal. Además, se resalta la relevancia del cuidado humano, que combina la precisión técnica con la empatía, la comunicación efectiva con el paciente y la familia, y la promoción de la dignidad y el confort. El presente estudio subraya que la seguridad, la formación especializada y la humanización del cuidado son elementos esenciales para mejorar los resultados clínicos y la calidad del manejo del paciente en ECMO.

Palabras clave: Oxigenación por Membrana Extracorpórea, ECMO, enfermero perfusionista, seguridad del paciente, prevención de complicaciones, cuidado crítico, humanización del cuidado, monitoreo hemodinámico, equipo multidisciplinario.

ABSTRACT

Extracorporeal Membrane Oxygenation (ECMO) has become a key tool in managing critically ill patients with severe respiratory or cardiac failure, providing temporary life support while the underlying cause is addressed. However, as a complex and invasive technique, the safe management of ECMO requires effective strategies for preventing complications and a comprehensive, patient-centered approach. This work highlights the essential role of the perfusion nurse, whose responsibilities include both the technical supervision of the extracorporeal circuit and the continuous monitoring of the patient's clinical condition, ensuring efficient coordination within the multidisciplinary team. The most frequent ECMO-associated complications are described, including hemorrhagic, thrombotic, infectious, mechanical, and neurological events, along with prevention strategies such as appropriate patient selection, continuous monitoring, adherence to standardized protocols, and ongoing staff training. Additionally, the relevance of humanized care is emphasized, integrating technical precision with empathy, effective communication with patients and families, and the promotion of dignity and comfort. This study underscores that safety, specialized training, and humanized care are essential elements for improving clinical outcomes and the overall quality of ECMO patient management.

Keywords: Extracorporeal Membrane Oxygenation, ECMO, perfusion nurse, patient safety, complication prevention, critical care, humanized care, hemodynamic monitoring, multidisciplinary team.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la Oxigenación por Membrana Extracorpórea (ECMO, por sus siglas en inglés *Extracorporeal Membrane Oxygenation*)¹ se ha consolidado como una herramienta esencial en el manejo de pacientes críticos que presentan insuficiencia respiratoria o cardíaca grave, especialmente en aquellos casos donde los tratamientos convencionales no son suficientes. Esta técnica de soporte vital avanzado permite mantener de manera temporal el intercambio gaseoso y la perfusión tisular, otorgando al organismo el tiempo necesario para que se traten las causas subyacentes de la enfermedad o para que los órganos comprometidos puedan recuperarse. Gracias a su capacidad para sostener funciones vitales en situaciones de alta complejidad, el ECMO ha demostrado mejorar significativamente la supervivencia y los resultados clínicos, convirtiéndose en un recurso indispensable en unidades de cuidados intensivos de alta complejidad, en servicios de cirugía cardiovascular y en el manejo de pacientes con falla multiorgánica refractaria a otras terapias.

El desarrollo del ECMO² representa un avance importante en la medicina crítica moderna. Su origen se remonta a los años setenta, cuando se introdujo como una extensión del concepto de circulación extracorpórea utilizada en cirugías cardíacas. Con el paso del tiempo, la tecnología se perfeccionó, los materiales se hicieron más bio-

compatibles y los sistemas más seguros, lo que permitió su aplicación prolongada en pacientes adultos, pediátricos y neonatales. Actualmente, se reconocen dos modalidades principales de ECMO: la veno-venosa (VV), utilizada principalmente para la insuficiencia respiratoria aguda grave, y la veno-arterial (VA), indicada en casos de shock cardiogénico o paro cardíaco refractario. Cada una de ellas requiere un abordaje clínico y técnico específico, así como un monitoreo constante y una intervención oportuna ante cualquier desviación de los parámetros fisiológicos.

El manejo del ECMO² implica una alta complejidad técnica y clínica, que exige la participación coordinada de un equipo multidisciplinario. Médicos intensivistas, cirujanos cardiovasculares, anestesiólogos, enfermeros, perfusionistas y kinesiólogos deben trabajar de manera conjunta para garantizar la seguridad del paciente y la eficacia del tratamiento. Dentro de este equipo, el enfermero perfusionista desempeña un rol central e insustituible. Este profesional es responsable no solo del montaje, inicio y supervisión técnica del circuito extracorpóreo, sino también de la evaluación continua del estado del paciente y del funcionamiento integral del sistema. Su labor requiere un conocimiento profundo de la fisiología cardíaca y pulmonar, de los principios de la hemodinámica y de la gasometría, así como de los posibles riesgos y complicaciones que pueden surgir durante el soporte.

El enfermero perfusionista tiene, además, la tarea de garantizar la seguridad clínica del paciente en todo momento. Esto incluye la prevención de eventos adversos como trombosis, hemorragias, infecciones o fallas mecánicas en el circuito. Para ello, debe realizar controles estrictos de anticoagulación, mantener una comunicación constante con el equipo médico, interpretar con precisión los datos clínicos y de laboratorio, y actuar de manera inmediata ante cualquier alteración. Su función va más allá del componente técnico: implica también la toma de decisiones críticas en tiempo real, la aplicación de protocolos de seguridad y la contribución activa a la mejora continua de los procesos dentro de la unidad de cuidados intensivos.

Sin embargo, la excelencia técnica por sí sola no es suficiente en el contexto del ECMO. El componente humano y ético del cuidado adquiere una relevancia especial en este ámbito. Los pacientes sometidos a ECMO se encuentran en situaciones extremas de vulnerabilidad, frecuentemente inconscientes, intubados o en estado crítico, mientras que sus familias atraviesan momentos de angustia e incertidumbre. En este escenario, el enfermero perfusionista cumple también una función de acompañamiento y comunicación, actuando como puente entre el equipo de salud y los familiares, brindando información comprensible y apoyo emocional. Este rol de contención humana es esencial para humanizar la atención, reducir la ansiedad de los familiares y favorecer la confianza en el equipo asistencial.

Asimismo, la práctica del ECMO² plantea desafíos éticos importantes relacionados con la limitación del esfuerzo terapéutico, la calidad de vida posterior y la toma de decisiones compartidas. El enfermero perfusionista, desde su posición cercana al paciente, participa de manera activa en la reflexión ética del equipo, contribuyendo con su experiencia y su perspectiva centrada en el bienestar integral del pa-

ciente. La humanización del cuidado, entendida como la integración de la competencia técnica con la empatía, el respeto y la dignidad, constituye un pilar fundamental del ejercicio profesional en estas circunstancias.

El uso del ECMO² ha cobrado especial relevancia en situaciones de emergencia sanitaria global, como la pandemia por COVID-19, en la que se observó un aumento significativo en los casos de insuficiencia respiratoria aguda grave refractaria. En este contexto, la demanda de equipos especializados y de personal capacitado se incrementó de forma considerable, evidenciando la necesidad de fortalecer la formación y la investigación en el ámbito del soporte extracorpóreo. El enfermero perfusionista, como profesional especializado, ha tenido un papel protagónico en la implementación segura de esta terapia, demostrando su capacidad para adaptarse a entornos cambiantes y a escenarios de alta presión asistencial.

El objetivo de este trabajo es describir las estrategias de seguridad y prevención de complicaciones durante el soporte ECMO³, destacando la importancia del cuidado integral del paciente por parte del enfermero perfusionista. Asimismo, se pretende resaltar la relevancia de la humanización del cuidado, mostrando cómo la combinación de competencias técnicas, científicas y éticas permite brindar un manejo seguro y, al mismo tiempo, respetuoso y empático. Este enfoque integral garantiza no solo la estabilidad fisiológica del paciente, sino también su bienestar emocional y el de su entorno familiar, contribuyendo a una atención más completa, compasiva y centrada en la persona.

Como conclusión, la Oxigenación por Membrana Extracorpórea representa una de las expresiones más avanzadas de la medicina moderna, y su éxito depende en gran medida de la preparación, compromiso y sensibilidad de los profesionales que la gestionan. El enfermero perfusionista se erige como figura clave en este proceso, combinando la ciencia y la técnica con el arte del cuidado humano, en un escenario donde cada decisión puede significar la diferencia entre la vida y la muerte. Por ello, resulta indispensable seguir profundizando en el conocimiento, la capacitación continua y la reflexión ética que permitan optimizar los resultados clínicos y fortalecer la calidad del cuidado en los pacientes sometidos a ECMO.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL ECMO

La Oxigenación por Membrana Extracorpórea (ECMO)⁴ es una técnica médica avanzada que se utiliza como un soporte vital temporal cuando los pulmones o el corazón no pueden cumplir correctamente sus funciones. En términos sencillos, el ECMO actúa como un "pulmón" o un "corazón artificial" fuera del cuerpo, permitiendo que el organismo siga recibiendo oxígeno y eliminando dióxido de carbono mientras el paciente se recupera de una enfermedad grave o de una lesión que, en muchos casos, puede ser reversible. Esta tecnología se emplea en situaciones críticas y representa una herramienta fundamental dentro de la medicina intensiva moderna, especialmente en aquellos casos en los que las terapias convencionales resultan insuficientes para mantener la vida.

El tratamiento con *ECMO* se aplica principalmente cuando los métodos tradicionales, como la ventilación mecánica, el uso de fármacos inotrópicos o vasopresores, y otras estrategias de soporte cardiorrespiratorio, no logran mantener estables los niveles de oxigenación ni la circulación sanguínea necesarios para la supervivencia. En tales circunstancias, el *ECMO* ofrece una alternativa temporal que sustituye las funciones vitales, brindando un “puente” hacia la recuperación o, en algunos casos, hacia un trasplante de pulmón o de corazón. De esta manera, el *ECMO* no solo permite prolongar la vida del paciente, sino que también otorga tiempo valioso al equipo médico para tratar la causa subyacente del fallo orgánico.

El principio básico del *ECMO*⁴ es relativamente sencillo de entender, aunque su aplicación clínica requiere una alta especialización. La máquina extrae sangre del cuerpo mediante un sistema de cánulas conectadas a grandes vasos sanguíneos. Luego, esta sangre pasa por un circuito extracorpóreo donde se encuentra una membrana semipermeable que actúa como pulmón artificial: permite la entrada de oxígeno y la eliminación del dióxido de carbono. Una vez oxigenada, la sangre retorna al paciente a través de otra cánula, completando así un circuito cerrado. Gracias a este proceso, se logra mantener una oxigenación adecuada y una perfusión tisular eficiente, mientras se “descansan” los órganos comprometidos, facilitando su recuperación progresiva.

Existen dos modalidades principales de *ECMO*, según la función que deba reemplazarse o asistirse:

- *ECMO* veno-venoso (VV): se utiliza principalmente en casos de insuficiencia respiratoria grave, donde los pulmones no son capaces de oxigenar la sangre, pero el corazón conserva su función. En este tipo, la sangre se extrae de una vena, pasa por la membrana oxigenadora y regresa al sistema venoso.
- *ECMO* veno-arterial (VA): se emplea cuando existe una falla cardíaca severa o un shock cardiogénico, ya que este circuito no solo oxigena la sangre, sino que también ayuda a mantener la circulación sistémica. En este caso, la sangre se extrae de una vena y se devuelve a una arteria, proporcionando soporte tanto pulmonar como circulatorio.

La selección del tipo de *ECMO* depende de la condición clínica del paciente y del objetivo terapéutico. En cualquier caso, la implementación de esta técnica requiere una evaluación exhaustiva, una planificación detallada y un monitoreo continuo, ya que el uso de *ECMO* implica riesgos y posibles complicaciones, como hemorragias, trombosis, infecciones o disfunciones mecánicas del sistema. Por ello, su manejo está reservado a centros de salud altamente especializados y a equipos multidisciplinarios con formación específica en soporte extracorpóreo.

El funcionamiento óptimo del *ECMO* depende de una estrecha coordinación entre diversos profesionales: médicos intensivistas, cirujanos cardiovasculares, enfermeros, perfusionistas y kinesiólogos, entre otros. Dentro de este equipo, el enfermero perfusionista cumple un rol esencial, ya que se encarga de la supervisión técnica del circuito, la vigilancia

constante de los parámetros hemodinámicos y respiratorios, y la prevención de complicaciones. Además, este profesional desempeña una labor crucial en el mantenimiento del equilibrio entre la tecnología y el cuidado humano, asegurando que el paciente reciba no solo un tratamiento eficaz, sino también una atención digna y empática.

La *ECMO*, se utiliza con frecuencia en pacientes con *síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA)*, en casos de miocarditis fulminante, shock cardiogénico, hipotermia severa, tromboembolismo pulmonar masivo y en situaciones de paro cardíaco refractario, entre otros. Asimismo, durante la pandemia por COVID-19, esta técnica adquirió un papel protagónico al brindar soporte vital a pacientes con insuficiencia respiratoria severa, cuando la ventilación mecánica convencional resultaba ineficaz. Su aplicación en estos casos permitió salvar numerosas vidas y demostró el valor del *ECMO* como herramienta de rescate en emergencias sanitarias.

A pesar de su eficacia, el *ECMO* no está exento de controversias. Su alto costo, la necesidad de personal altamente entrenado y el riesgo inherente a la manipulación extracorpórea de la sangre generan un debate constante sobre la selección adecuada de los pacientes y el momento óptimo para iniciar o retirar el soporte. En este sentido, la toma de decisiones debe basarse en criterios clínicos rigurosos, considerando siempre el pronóstico del paciente y la posibilidad de una recuperación significativa de la función orgánica.

La Oxigenación por Membrana Extracorpórea representa uno de los mayores avances tecnológicos en la atención de pacientes críticos. Su capacidad para sustituir temporalmente las funciones vitales del corazón y los pulmones ha revolucionado el manejo de la insuficiencia cardiorrespiratoria, ofreciendo nuevas oportunidades de vida a personas que, hasta hace pocas décadas, no habrían tenido opciones terapéuticas. Sin embargo, su éxito depende no solo de la tecnología, sino también del compromiso, la preparación y la sensibilidad de los profesionales que la operan. En este contexto, el *ECMO* se consolida como una combinación perfecta entre la ciencia médica moderna y el arte del cuidado humano.

Los fundamentos físicos⁵, en condiciones normales, el proceso de oxigenación de la sangre ocurre dentro de los alvéolos pulmonares, estructuras microscópicas en forma de sacos ubicadas al final de los bronquiolos, cuya función es facilitar el intercambio gaseoso entre el aire inhalado y la sangre. Cada pulmón contiene millones de alvéolos, lo que proporciona una superficie total de intercambio de aproximadamente 70 metros cuadrados, un área extraordinariamente amplia que permite que el oxígeno y el dióxido de carbono se difundan de manera eficiente.

El mecanismo de intercambio gaseoso se basa en un principio fisiológico fundamental: la difusión pasiva de gases a través de una membrana semipermeable, guiada por las diferencias de presión parcial de los mismos.

El oxígeno (O_2) pasa desde el aire inspirado, que tiene una presión parcial elevada, hacia los capilares pulmonares, donde su concentración es menor.

De forma simultánea, el *dióxido de carbono* (CO_2), un producto de desecho del metabolismo celular, se desplaza en dirección contraria: desde la sangre —donde su presión parcial es más alta— hacia el aire alveolar, que luego es expulsado durante la exhalación.

Este proceso garantiza que la sangre arterial que llega al resto del organismo esté ricamente oxigenada y que el CO_2 sea eliminado de manera constante, manteniendo así el equilibrio ácido-base y el adecuado funcionamiento de los tejidos.

Sin embargo, cuando el pulmón sufre una alteración estructural o funcional —como ocurre en la neumonía grave, el *síndrome de dificultad respiratoria aguda* (SDRA), el edema pulmonar, la fibrosis pulmonar o en situaciones de shock séptico—, la difusión de gases se ve gravemente comprometida. La presencia de líquido, inflamación o daño alveolar interfiere con la entrada del oxígeno y la salida del dióxido de carbono, generando hipoxemia (bajo nivel de oxígeno en sangre) e hipercapnia (acumulación de CO_2). Cuando los tratamientos convencionales como la ventilación mecánica o la oxigenoterapia de alto flujo no logran revertir esta situación, el paciente puede entrar en un estado crítico de insuficiencia respiratoria.

En estos casos, la Oxigenación por Membrana Extracorpórea (ECMO) se convierte en una herramienta terapéutica esencial. Este sistema sustituye temporalmente la función pulmonar mediante el uso de una membrana oxigenadora semipermeable, que reproduce de manera artificial el proceso natural de intercambio gaseoso. En el circuito extracorpóreo, la sangre venosa del paciente cargada de CO_2 y pobre en oxígeno, es extraída del organismo, impulsada por una bomba centrífuga a través de un oxigenador donde se produce la difusión de gases. El oxígeno atraviesa la membrana hacia la sangre, mientras el dióxido de carbono se elimina. Una vez oxigenada, la sangre retorna al cuerpo, asegurando así una perfusión adecuada de los órganos vitales.

Esta sustitución extracorpórea del pulmón permite que el tejido pulmonar dañado “descanse” y se recupere, evitando el daño adicional causado por la presión positiva o el alto flujo de oxígeno asociados a la ventilación mecánica prolongada. Además, el ECMO ofrece la ventaja de mantener un control preciso sobre los niveles de oxigenación, ventilación y equilibrio ácido-base, lo que resulta fundamental en pacientes críticos con escasa reserva fisiológica.

Desde una perspectiva fisiológica, el ECMO veno-venoso (VV) actúa como un sistema de ventilación artificial externa, reemplazando exclusivamente la función pulmonar sin intervenir en la hemodinamia. Esto permite optimizar la oxigenación arterial y reducir la concentración de CO_2 , mejorando el pH sanguíneo y la oxigenación tisular sin sobrecargar el corazón.

Por otro lado, además de reemplazar la función respiratoria, el ECMO también puede proporcionar soporte circulatorio, convirtiéndose en un sustituto temporal del corazón cuando este es incapaz de mantener una perfusión adecuada. Esta capacidad depende del tipo de modalidad utilizada, siendo la *venoarterial* (VA) la indicada para situaciones de compromiso hemodinámico severo.

En la modalidad ECMO (VA), la sangre venosa desoxigenada es extraída del cuerpo y pasa por el oxigenador, donde se enriquece con oxígeno y se libera del dióxido de carbono. A diferencia del ECMO veno-venoso, en esta modalidad la sangre oxigenada es devuelta al sistema arterial mediante una bomba centrífuga que ejerce la función de bombeo, reemplazando así la acción del corazón. Esta bomba genera el flujo necesario para mantener la presión arterial y asegurar que los órganos vitales —como el cerebro, los riñones, el hígado y los músculo, continúen recibiendo oxígeno y nutrientes.

El soporte circulatorio con ECMO es especialmente útil en casos de insuficiencia cardíaca aguda, shock cardiogénico, miocarditis fulminante, paro cardiorrespiratorio, síndrome post-cardiotomía, o como puente al trasplante cardíaco. En estas situaciones, el corazón puede estar gravemente deprimido y no ser capaz de mantener un gasto cardíaco efectivo. El ECMO, al asumir la función de bombeo, permite estabilizar al paciente y ganar tiempo para que el miocardio se recupere, se implemente una terapia definitiva o se valore la viabilidad del trasplante.

Desde el punto de vista fisiológico, este soporte circulatorio artificial restablece el flujo sanguíneo sistémico y mejora la perfusión tisular, lo que contribuye a prevenir la isquemia y el daño multiorgánico. Asimismo, al disminuir la carga de trabajo del corazón, reduce el consumo de oxígeno miocárdico y promueve la recuperación funcional del músculo cardíaco.

No obstante, el uso de ECMO VA requiere un monitoreo continuo y una regulación precisa de los parámetros hemodinámicos, ya que un flujo excesivo o una presión inadecuada pueden alterar la fisiología circulatoria natural. Es fundamental mantener un equilibrio entre el flujo del ECMO y la función residual del corazón para evitar complicaciones como el estancamiento sanguíneo, la trombosis o la sobrecarga ventricular.

Por lo tanto, el ECMO no solo representa un soporte vital avanzado, sino también una compleja herramienta de control fisiológico que permite mantener la homeostasis del organismo en situaciones de extrema gravedad. Su efectividad depende del conocimiento profundo de los principios fisiológicos del intercambio gaseoso y del soporte circulatorio, así como de la capacidad del equipo de salud para interpretar y responder rápidamente a los cambios clínicos del paciente. En este contexto, la intervención oportuna, la vigilancia constante y la coordinación entre los distintos profesionales son esenciales para optimizar los resultados y reducir los riesgos asociados.

Componentes del sistema ECMO

El sistema de ECMO⁶ está compuesto por varios elementos que trabajan en conjunto para mantener con vida al paciente cuando sus pulmones o su corazón no pueden hacerlo por sí mismos. Cada componente cumple una función específica dentro del circuito extracorpóreo y todos deben coordinarse de manera precisa para asegurar que la sangre circule, se oxigene y vuelva al cuerpo en las condiciones adecuadas.

El proceso comienza con la canulación, que consiste en la colocación de cánulas o tubos dentro de los vasos sanguíneos del paciente. Estas cánulas son los conductos que permiten extraer la sangre del organismo y luego devolverla una vez que ha sido oxigenada por el sistema. La ubicación exacta de las cánulas depende del tipo de soporte *ECMO* que se utilice. En el *ECMO* veno-venoso, las cánulas se colocan en las venas, ya que el objetivo principal es sustituir la función pulmonar, mientras que en el *ECMO* veno-arterial una cánula se coloca en una vena y otra en una arteria, permitiendo además brindar apoyo a la función cardíaca. La correcta colocación de las cánulas es fundamental, ya que garantiza un flujo sanguíneo eficiente y evita complicaciones como obstrucciones o fugas.

Una vez establecida la canulación, la sangre es impulsada a través del circuito extracorpóreo por medio de una bomba, que generalmente es de tipo centrífugo. Esta bomba cumple una función similar a la del corazón, ya que mantiene la sangre en movimiento a un flujo constante. Gracias a ella, el equipo médico puede controlar la cantidad de sangre que circula fuera del cuerpo, lo que normalmente varía entre 2 y 6 litros por minuto, dependiendo del tamaño, la edad y las necesidades clínicas del paciente. Es importante que el flujo sea estable y continuo, ya que una velocidad inadecuada podría comprometer la oxigenación o causar daños en los glóbulos rojos.

El oxigenador de membrana es considerado el corazón del sistema *ECMO*, pues se encarga del intercambio de gases vitales: añade oxígeno a la sangre y elimina el CO_2 . Este dispositivo está diseñado con materiales biocompatibles, como el polimetilpenteno, que evitan reacciones indeseadas dentro del cuerpo y garantizan la seguridad del paciente. Su estructura se compone de una serie de fibras huecas o microporosas a través de las cuales circulan los gases, imitando el proceso natural que ocurre en los pulmones. De esta manera, la sangre que pasa por el oxigenador sale completamente oxigenada y lista para ser devuelta al organismo.

Otro componente esencial del sistema es el intercambiador de calor, cuya función es mantener la temperatura de la sangre dentro de rangos adecuados mientras circula fuera del cuerpo. Dado que la sangre tiende a enfriarse al pasar por el circuito extracorpóreo, este dispositivo regula su temperatura para evitar tanto la hipotermia como el sobrecalentamiento, garantizando así el equilibrio térmico necesario para el correcto funcionamiento de los órganos.

El sistema *ECMO*⁷ cuenta con un módulo de monitoreo y seguridad, encargado de vigilar en tiempo real todas las variables críticas del circuito. Este sistema controla la presión, el flujo sanguíneo, la saturación de oxígeno, la temperatura y otros parámetros vitales, proporcionando información constante al equipo médico. Además, está equipado con alarmas que se activan automáticamente ante cualquier irregularidad o fallo técnico, como obstrucciones, cambios bruscos de presión o alteraciones en la oxigenación, permitiendo actuar de inmediato para prevenir complicaciones.

Todos estos componentes hacen posible que el *ECMO* funcione como un sistema de soporte vital avanzado, capaz de sustituir temporalmente la función del corazón y/o de los pulmones. Su correcto manejo requiere personal altamen-

te especializado y una supervisión continua, ya que cualquier desequilibrio en el circuito puede poner en riesgo la estabilidad del paciente. Gracias a esta tecnología, se ofrece una oportunidad de recuperación en situaciones críticas donde otros tratamientos no resultan suficientes.

Tipos de *ECMO* y principios de funcionamiento

La Oxigenación por Membrana Extracorpórea (*ECMO*) es una técnica de soporte vital avanzada que sustituye de manera temporal la función pulmonar y/o cardíaca en pacientes con insuficiencia cardiorrespiratoria grave refractaria al tratamiento convencional. Su principio fundamental consiste en extraer la sangre del paciente mediante una cánula venosa, hacerla circular a través de un circuito extracorpóreo donde se produce el intercambio gaseoso, y retornarla posteriormente al sistema circulatorio. El oxigenador de membrana actúa como un "pulmón artificial", permitiendo la eliminación de CO_2 y la oxigenación adecuada de la sangre antes de su reinfusión.

Existen dos tipos principales de *ECMO*⁸, cuya elección depende del tipo de insuficiencia orgánica que se desea tratar: la *ECMO* veno-venosa (*VV*) y la *ECMO* *VA*.

El *ECMO* veno-venoso (*VV*) toma la sangre de una vena, la pasa por la máquina de *ECMO* y la devuelve a otra vena. Se usa cuando el problema principal es respiratorio. Normalmente se coloca en la vena femoral y la yugular interna.

El *ECMO* veno-arterial (*VA*) también toma la sangre de una vena, pero después de pasar por el circuito la devuelve a una arteria. Ofrece apoyo tanto al corazón como a los pulmones. Suele colocarse en la vena femoral y en la arteria femoral o carótida.

En la *ECMO* *VV*, la sangre se extrae habitualmente de la vena femoral y se devuelve a la circulación venosa a través de la vena yugular interna. Este circuito permite realizar un intercambio gaseoso eficaz, corrigiendo la hipoxemia y la hipercapnia en casos de insuficiencia respiratoria aguda grave —como el síndrome de distrés respiratorio agudo (*SDRA*)—, pero no proporciona soporte hemodinámico. El corazón del paciente sigue siendo responsable de mantener el gasto cardíaco y la perfusión tisular.

Por el contrario, la *ECMO* *VA* se utiliza en situaciones de fracaso cardiorrespiratorio combinado, como en el shock cardiogénico, la miocarditis aguda, la parada cardiorrespiratoria refractaria o el posoperatorio de cirugía cardíaca. En este caso, la sangre desoxigenada se extrae por vía venosa (generalmente la vena femoral) y se devuelve al sistema arterial (arteria femoral o carótida), proporcionando tanto soporte respiratorio como circulatorio. De este modo, la *ECMO* *VA* asume parcialmente la función del corazón, generando un flujo anterógrado que contribuye a mantener la presión arterial y la perfusión sistémica.

El sistema *ECMO*⁸ funciona gracias al trabajo conjunto de varios componentes esenciales. La bomba centrífuga impulsa la sangre de forma continua por el circuito extracorpóreo y el oxigenador de membrana permite que el oxígeno pase a la sangre y que el CO_2 se elimine. El intercambiador de calor regula la temperatura de la sangre

antes de que vuelva al cuerpo y los sensores de presión y saturación ayudan a vigilar en tiempo real cómo está funcionando el soporte para evitar complicaciones. En cualquier tipo de ECMO el flujo extracorpóreo asegura la oxigenación y la eliminación del CO_2 pero solo la modalidad venoarterial puede aportar soporte hemodinámico porque reemplaza en parte la función de bombeo del corazón. La elección entre ECMO venovenoso o venoarterial debe hacerse según la situación global del paciente teniendo en cuenta la causa del fallo orgánico su estado hemodinámico y la presencia de contraindicaciones. En los últimos años se han desarrollado también configuraciones híbridas como la ECMO veno arterio venosa que combina soporte respiratorio y circulatorio y resulta especialmente útil en fases de transición o durante el destete del soporte. Estas opciones más avanzadas muestran cómo la ECMO ha ido evolucionando y se ha convertido en un pilar fundamental de la medicina crítica actual.

Física y fisiología del intercambio gaseoso extracorpóreo

La física y fisiología del intercambio gaseoso extracorpóreo en el sistema ECMO⁹ se basa en los mismos principios que regulan el intercambio de gases en los pulmones, pero ocurre fuera del cuerpo humano, dentro del oxigenador de membrana. Este proceso permite que la sangre reciba oxígeno y elimine el dióxido de carbono (CO_2) de manera controlada y eficiente, garantizando así el mantenimiento de una adecuada oxigenación tisular mientras los pulmones o el corazón del paciente se recuperan.

El fundamento físico principal que explica cómo se realiza este intercambio de gases es la Ley de Fick⁹ de la difusión, la cual establece que la cantidad de gas que atraviesa una membrana depende de tres factores fundamentales: la diferencia de presión entre ambos lados de la membrana, el área disponible para el intercambio y el grosor de la barrera por la que pasa el gas. Aplicado al ECMO, esto significa que cuanto mayor sea la diferencia de presión parcial entre el oxígeno del gas y la sangre desoxigenada, más eficiente será la difusión del oxígeno hacia la sangre. De igual forma, si la membrana del oxigenador tiene una superficie amplia y es lo suficientemente delgada, el intercambio gaseoso se producirá con mayor rapidez y eficacia. En cambio, si la membrana es más gruesa o presenta alguna alteración, la difusión se hace más lenta y se reduce la capacidad de oxigenación.

Otro elemento importante dentro del sistema ECMO es el flujo de gas barrido, conocido como *sweep gas*. Este flujo consiste en una corriente continua de gas que pasa a través del oxigenador y tiene la función principal de eliminar el dióxido de carbono producido por el metabolismo del paciente. Cuanto mayor sea la velocidad del flujo de gas, más rápidamente se retirará el CO_2 de la sangre, lo que ayuda a mantener el equilibrio ácido-base del organismo. Sin embargo, este parámetro debe ajustarse cuidadosamente, ya que un flujo demasiado alto podría alterar la estabilidad del sistema, mientras que uno insuficiente impediría una eliminación adecuada del CO_2 .

Por otro lado, el flujo sanguíneo extracorpóreo representa la cantidad de sangre que circula por el circuito del ECMO

en un minuto. Este flujo depende de la potencia de la bomba y de las condiciones del paciente, como su tamaño corporal o su demanda metabólica. Cuanto mayor sea el flujo, mayor será el volumen de sangre que pasa por el oxigenador y, por tanto, más sangre podrá oxigenarse en cada ciclo. En los pacientes críticos, el control del flujo es esencial, ya que influye directamente en la cantidad total de oxígeno que se entrega a los tejidos del cuerpo.

También juega un papel determinante la *fracción inspirada de oxígeno* (FiO_2), que corresponde a la concentración de oxígeno que entra al oxigenador desde la fuente externa. Un valor alto de FiO_2 implica que la sangre recibirá un contenido mayor de oxígeno, incrementando su saturación y mejorando la oxigenación sistémica del paciente. No obstante, este parámetro debe regularse con precaución, ya que una concentración de oxígeno excesiva mantenida por largos periodos podría causar daños oxidativos a las células.

En conjunto, estos factores, la diferencia de presiones según la Ley de Fick, el flujo de gas barrido, el flujo sanguíneo y la fracción inspirada de oxígeno, determinan la eficacia del intercambio gaseoso dentro del circuito ECMO. El equilibrio entre todos ellos permite mantener niveles adecuados de oxígeno y dióxido de carbono en la sangre, reproduciendo de manera artificial el complejo proceso de respiración que normalmente ocurre en los pulmones. Este control preciso de variables físicas y fisiológicas es lo que convierte al ECMO en una herramienta tan efectiva y vital para el soporte de pacientes con insuficiencia respiratoria o cardíaca grave.

Indicaciones generales

El uso del sistema ECMO¹⁰ se reserva para situaciones críticas en las que las terapias convencionales resultan insuficientes para mantener una adecuada función respiratoria o cardíaca. Su finalidad principal es proporcionar un soporte vital temporal, permitiendo la oxigenación y perfusión adecuadas de los tejidos mientras los pulmones o el corazón del paciente se recuperan o se dispone de una terapia definitiva, como el trasplante de órgano.

El ECMO se aplica fundamentalmente en pacientes con enfermedades potencialmente reversibles, o en aquellos que presentan una posibilidad real de recuperación con un soporte adecuado. No se considera una terapia curativa, sino una medida de apoyo puente que otorga tiempo para la resolución de la causa subyacente del fallo cardiopulmonar.

Una de las principales indicaciones del ECMO es la insuficiencia respiratoria hipoxémica que no mejora a pesar de la ventilación mecánica óptima y las estrategias de rescate convencionales (como el decúbito prono o el uso de relajantes neuromusculares). Se considera su uso cuando la relación $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ es menor de 80 mmHg durante más de seis horas o menor de 50 mmHg durante más de tres horas, pese a la máxima intervención ventilatoria.

En estos casos, el ECMO permite mantener una oxigenación adecuada sin causar un daño adicional al parénquima pulmonar, al posibilitar el uso de estrategias ventilato-

rias protectoras con bajos volúmenes corrientes y presiones reducidas.

El SDRA representa una de las causas más frecuentes de uso de *ECMO* *VV*. En esta condición, los pulmones sufren una inflamación difusa y severa que altera el intercambio gaseoso y provoca hipoxemia refractaria. El *ECMO* proporciona un soporte respiratorio extracorpóreo, asumiendo temporalmente la función pulmonar y favoreciendo la recuperación del tejido pulmonar mediante la reducción del estrés mecánico y la oxigenación controlada.

Asimismo, ha demostrado mejorar la supervivencia en casos seleccionados de SDRA grave secundario a neumonía viral (como influenza o COVID-19), sepsis o aspiración masiva.

Otra indicación relevante del *ECMO*¹⁰, especialmente en su modalidad *VA*, es la insuficiencia cardíaca aguda o el shock cardiogénico que no responde al soporte farmacológico ni mecánico convencional (inotrópicos, balón de contrapulsación).

Situaciones como el infarto agudo de miocardio complicado, la miocarditis fulminante, o el colapso circulatorio postresucitación pueden requerir *ECMO* para mantener la perfusión sistémica mientras se maneja la causa primaria o se espera la recuperación de la función cardíaca.

En estos escenarios, el *ECMO* actúa como un sustituto temporal de la función de bomba del corazón, garantizando el flujo sanguíneo y el aporte de oxígeno a los órganos vitales.

El *ECMO* también puede utilizarse como soporte temporal tras una cirugía cardíaca compleja, especialmente en pacientes con dificultad para destetarse de la circulación extracorpórea o con disfunción miocárdica transitoria postoperatoria. Este soporte permite mantener la estabilidad hemodinámica mientras el miocardio se recupera del estrés quirúrgico o de la isquemia-reperusión.

En pacientes con enfermedad cardíaca o pulmonar terminal, el *ECMO* puede emplearse como puente hacia una terapia definitiva, como el trasplante cardíaco o pulmonar. En estos casos, su función es mantener al paciente en condiciones clínicas óptimas hasta la disponibilidad de un órgano compatible o hasta la implementación de un dispositivo de asistencia mecánica de largo plazo.

En los últimos años, se ha expandido el uso del *ECMO* a otras situaciones especiales, como el *paro cardiorrespiratorio refractario (ECPR)*, el edema pulmonar agudo por inmersión, y casos seleccionados de hipotermia severa o intoxicaciones por fármacos cardiodepresores, siempre que exista una posibilidad razonable de recuperación neurológica y sistémica.

Contraindicaciones

Aunque el sistema *ECMO*¹¹ representa una herramienta terapéutica avanzada y potencialmente salvadora, no todos los pacientes son candidatos adecuados para su utilización. Su aplicación requiere una valoración integral y cuidadosa, ya que en determinadas circunstancias el tratamiento puede no aportar beneficios clínicos significativos o incluso aumentar el riesgo de complicaciones graves.

Una de las principales contraindicaciones absolutas del *ECMO* es la presencia de lesiones neurológicas irreversibles, como una anoxia cerebral prolongada o muerte encefálica confirmada. En tales situaciones, el soporte extracorpóreo no ofrece un beneficio real, puesto que la recuperación de la función vital carece de sentido sin la preservación de la función neurológica. Implementar *ECMO* en estos casos solo prolongaría el proceso biológico sin mejorar la calidad de vida ni el pronóstico global del paciente.

El *ECMO*¹¹ no debe emplearse en pacientes con enfermedades en fase terminal, como neoplasias metastásicas avanzadas, insuficiencia multiorgánica irreversible o patologías degenerativas progresivas sin tratamiento curativo. En estas circunstancias, el soporte extracorpóreo únicamente extendería un proceso clínico sin posibilidad de reversión, con escaso o nulo beneficio clínico y un elevado costo humano y sanitario. El principio ético de proporcionalidad terapéutica sugiere evitar su uso cuando el sufrimiento y las complicaciones superan las posibilidades reales de recuperación.

Otra contraindicación relevante es la presencia de hemorragias activas o coagulopatías severas. El sistema *ECMO* requiere anticoagulación continua, generalmente con heparina, para evitar la formación de trombos dentro del circuito extracorpóreo. En pacientes con sangrado gastrointestinal, intracraneal o postquirúrgico activo, este requisito puede agravar de forma crítica el cuadro clínico. Por tanto, el riesgo de hemorragia incontrolable debe evaluarse cuidadosamente frente al beneficio esperado del soporte.

Asimismo, las alteraciones hematológicas graves, como trombocitopenia, disfunción plaquetaria o coagulopatías por sepsis, pueden comprometer la seguridad del procedimiento y dificultar su manejo.

La edad avanzada no constituye una contraindicación absoluta, pero sí un factor de riesgo importante. Los pacientes de edad avanzada suelen presentar menor reserva fisiológica, mayor vulnerabilidad a las complicaciones y una recuperación más limitada. De igual manera, la coexistencia de múltiples comorbilidades crónicas (como insuficiencia renal terminal, cirrosis hepática avanzada, enfermedad pulmonar obstructiva crónica severa o cardiopatía isquémica grave) reduce significativamente la probabilidad de éxito y limita la posibilidad de mantener una terapia prolongada con seguridad.

En estos casos, el *ECMO* debe considerarse únicamente cuando el cuadro clínico es potencialmente reversible y el paciente cuenta con una expectativa razonable de recuperación funcional.

A pesar de los avances tecnológicos y del incremento de las indicaciones clínicas, existen determinadas situaciones en las que la instauración de soporte con *ECMO* puede resultar desaconsejada o requerir una valoración más exhaustiva. La selección adecuada de los candidatos es esencial para optimizar los resultados y evitar la aplicación de una terapia invasiva en contextos de escasa probabilidad de beneficio.

Entre las principales contraindicaciones relativas o absolutas se incluyen el fallo multiorgánico irreversible, en el que la afectación simultánea y severa de múltiples sistemas imposibilita la recuperación funcional aun con soporte extracorpóreo. Asimismo, la infección sistémica no controlada, como la sepsis grave o el shock séptico refractario, representa una situación de riesgo elevado, salvo en aquellos casos donde se prevea una reversibilidad rápida tras el tratamiento antimicrobiano o el control del foco infeccioso.

También deben considerarse las limitaciones anatómicas o técnicas, tales como la imposibilidad de una canulación vascular adecuada o la presencia de alteraciones estructurales que impidan el correcto funcionamiento del circuito extracorpóreo. Estas condiciones pueden incrementar el riesgo de complicaciones mecánicas o tromboembólicas y comprometer la eficacia del soporte.

Por último, las limitaciones logísticas o la ausencia de un centro con experiencia y recursos humanos especializados constituyen un factor determinante. La *ECMO* requiere un manejo experto, monitorización continua y protocolos específicos de seguridad, por lo que su éxito depende directamente de la disponibilidad de equipos multidisciplinarios entrenados y de una infraestructura adecuada. En estos casos, debe valorarse la derivación precoz a un centro de referencia *ECMO*, donde se garantice la atención óptima y la reducción de riesgos asociados al procedimiento.

Antes de iniciar *ECMO*, el equipo multidisciplinario (intensivistas, cirujanos cardiovasculares, perfusionistas, enfermería especializada y bioeticistas) debe realizar una evaluación integral del paciente, considerando el estado clínico, pronóstico, objetivos terapéuticos y preferencias del paciente o su familia. El principio rector es garantizar que los beneficios potenciales superen claramente los riesgos y que la intervención sea proporcional, ética y médicamente justificada.

SEGURIDAD DEL PACIENTE EN ECMO

La seguridad del paciente¹² en la terapia de *ECMO* constituye un pilar esencial dentro del manejo clínico integral, dado que este procedimiento asume temporalmente funciones vitales como la respiración y la circulación sistémica. Por ello, cualquier falla técnica, error humano o desviación en los protocolos establecidos puede derivar en consecuencias graves e incluso fatales.

El principio de seguridad en *ECMO* se fundamenta en la prevención, detección temprana y respuesta inmediata ante eventos adversos, mediante la aplicación rigurosa de protocolos estandarizados, el entrenamiento continuo del personal y la vigilancia permanente del paciente y del circuito extracorpóreo. Su objetivo principal es reducir los riesgos asociados al procedimiento, optimizar los resultados clínicos y garantizar una atención eficaz, ética y humanizada.

Principios generales de seguridad en ECMO

Los principios generales de seguridad en *ECMO* se basan en tres ideas clave. La primera es la prevención de eventos adversos, aplicando medidas para evitar complicaciones como trombosis del circuito, hemorragias, fallos mecáni-

cos o infecciones. La segunda es la detección y actuación temprana, lo que implica vigilar de forma continua los parámetros hemodinámicos y respiratorios del paciente, así como el funcionamiento del sistema mediante monitoreo y observación constante. La tercera es la mejora continua, revisando incidentes, analizando sus causas y reforzando el aprendizaje del equipo para mantener una cultura de seguridad centrada en el paciente.

El *ECMO* requiere un equipo multidisciplinario bien coordinado, formado por intensivistas, cirujanos cardiovasculares, perfusionistas, enfermería especializada, fisioterapeutas y personal técnico entrenado. Cada uno tiene un papel importante: el intensivista controla la estabilidad del paciente y ajusta el soporte, el perfusionista se encarga del circuito y la anticoagulación, la enfermería asegura la asepsia y la monitorización, el cirujano realiza la canulación y resuelve complicaciones, y el fisioterapeuta ayuda en la movilización y la rehabilitación. Una comunicación clara y una toma de decisiones conjunta son esenciales para anticipar riesgos y actuar rápido ante cualquier emergencia.

Protocolos, monitoreo y gestión del riesgo clínico

El uso seguro del *ECMO* requiere seguir de forma estricta protocolos clínicos y técnicos que abarcan desde la selección del paciente hasta la retirada del soporte. Esto incluye un monitoreo hemodinámico y respiratorio continuo para controlar la presión arterial, la saturación de oxígeno, los gases arteriales, el lactato y los parámetros del flujo extracorpóreo. También implica vigilar de forma constante el circuito para comprobar que no haya burbujas de aire, fugas, trombos ni fallos en la bomba o en la membrana oxigenadora. Es fundamental mantener un control adecuado de la anticoagulación mediante el ACT o el anti Xa para equilibrar el riesgo de trombosis y hemorragia. La prevención de infecciones se basa en el manejo estéril del circuito, el cuidado de los sitios de canulación y el cumplimiento de las medidas de asepsia. Además, se debe revisar y mantener el equipo asegurando su buen funcionamiento durante toda la terapia y contando con dispositivos de respaldo en caso de fallo. La gestión del riesgo clínico consiste en identificar posibles problemas en cada etapa del proceso asistencial, preparar planes de contingencia y fomentar un ambiente donde se puedan notificar incidentes sin sanciones, con el fin de mejorar continuamente la seguridad del paciente.

Formación y competencia del personal

La capacitación continua del equipo humano es un requisito indispensable para garantizar la seguridad en *ECMO*. Los profesionales deben recibir entrenamiento teórico-práctico especializado, incluyendo simulaciones clínicas que permitan ensayar la respuesta ante situaciones críticas, como fallos del sistema, eventos de hipoxemia, hipotensión o paro circulatorio durante la terapia.

Además, la evaluación periódica de competencias y la participación en programas de actualización y certificación *ECMO*, fortalecen la preparación técnica y favorecen una atención uniforme y de alta calidad.

Cultura institucional de seguridad

Más allá de la técnica, la seguridad del paciente en *ECMO* depende de una cultura organizacional que favorezca la comunicación, la responsabilidad compartida y la mejora continua. Es esencial que las instituciones promuevan un entorno libre de culpas donde los errores se entiendan como oportunidades de aprendizaje, que se realicen reuniones de retroalimentación después de cada caso *ECMO* y que se lleven a cabo auditorías internas con seguimiento de indicadores de calidad como la mortalidad, las complicaciones y los eventos adversos prevenibles. También es importante ofrecer apoyo psicológico y emocional tanto a los pacientes como al personal sanitario. Esta cultura de seguridad ayuda a reducir riesgos y refuerza la confianza de los pacientes y sus familias en el equipo de salud, impulsando un modelo de atención centrado en la persona y en altos estándares de calidad asistencial.

COMPLICACIONES MÁS FRECUENTES DE LA ECMO

La *ECMO* es una terapia avanzada de soporte vital que permite sustituir temporalmente las funciones respiratoria y/o circulatoria en pacientes con insuficiencia grave. Aunque su uso ha demostrado mejorar la supervivencia en situaciones críticas, también conlleva una serie de riesgos y posibles complicaciones que deben ser reconocidos, prevenidos y tratados oportunamente. La complejidad del procedimiento, junto con la interacción entre el paciente, el circuito extracorpóreo y los tratamientos concomitantes, genera múltiples desafíos clínicos que requieren una vigilancia continua.

Durante el funcionamiento del *ECMO*, la sangre del paciente entra en contacto con superficies y materiales artificiales externos al organismo, lo que puede alterar la hemostasia, activar respuestas inflamatorias y modificar los procesos fisiológicos normales. Estas alteraciones pueden dar origen a complicaciones que, por su naturaleza, se clasifican en: hemorrágicas, trombóticas, mecánicas, infecciosas, neurológicas, hemodinámicas, metabólicas y relacionadas con el manejo humano.

Complicaciones hemorrágicas

Las hemorragias son una de las complicaciones más frecuentes y graves durante la terapia *ECMO*. Su origen está estrechamente relacionado con la necesidad de mantener una anticoagulación continua, generalmente con heparina, para evitar la formación de trombos en el circuito extracorpóreo. Sin embargo, este tratamiento, aunque indispensable, incrementa el riesgo de sangrado tanto en sitios quirúrgicos como en órganos internos.

Las zonas más afectadas suelen ser los puntos de canulación, las heridas quirúrgicas, el aparato digestivo, los pulmones y, en casos más graves, el sistema nervioso central. Las hemorragias intracraneales son particularmente devastadoras y se asocian con una alta mortalidad, especialmente en neonatos, lactantes o pacientes con alteraciones previas de la coagulación.

Para minimizar este riesgo, se requiere un monitoreo estricto del grado de anticoagulación, mediante pruebas como

el tiempo de coagulación activado (*ACT*), el tiempo parcial de tromboplastina activado (*TTPa*) o la medición de anti-factor Xa, ajustando las dosis de anticoagulante según las características y evolución de cada paciente. Además, se deben vigilar los signos clínicos de sangrado y, ante su aparición, realizar una evaluación inmediata del balance riesgo-beneficio de continuar la anticoagulación.

Complicaciones trombóticas

A pesar del uso de anticoagulantes, las complicaciones trombóticas son igualmente relevantes. El contacto de la sangre con las superficies artificiales del circuito activa mecanismos procoagulantes e inflamatorios, lo que puede generar formación de coágulos (trombos) dentro del sistema. Estos trombos pueden obstruir parcial o totalmente el flujo en la bomba centrífuga, en la membrana oxigenadora o en las líneas del circuito, reduciendo la eficiencia del intercambio gaseoso y provocando una disminución en la oxigenación sistémica.

Si estos coágulos se desprenden, pueden originar embolias sistémicas o pulmonares, con consecuencias potencialmente fatales. Por ello, se requiere una vigilancia constante del circuito, con inspección visual periódica, monitorización de las presiones pre y posoxigenador, control de gradientes y reemplazo del componente afectado ante la sospecha de trombosis. Mantener un equilibrio adecuado entre la anticoagulación y la prevención del sangrado constituye un desafío permanente en la práctica clínica del *ECMO*.

Complicaciones mecánicas

El sistema *ECMO* está compuesto por dispositivos altamente complejos —como bombas, oxigenadores, cánulas y sensores—, lo que hace posible la aparición de fallos mecánicos o técnicos en cualquier momento del tratamiento. Entre las complicaciones más frecuentes se incluyen la rotura o desconexión de cánulas, fugas de aire o sangre, obstrucciones en las líneas, fallo de la bomba centrífuga, deterioro del oxigenador o formación de burbujas gaseosas en el circuito.

Cualquiera de estas fallas puede comprometer de manera inmediata el soporte vital, provocando hipoxemia súbita, hipotensión, pérdida de flujo o paro circulatorio. Ante ello, es indispensable realizar mantenimientos preventivos regulares, contar con equipos de respaldo y disponer de personal entrenado en respuesta rápida ante emergencias técnicas. Además, se deben efectuar pruebas de seguridad antes de iniciar la terapia y revisiones programadas durante su curso, garantizando la integridad funcional de todo el sistema.

Complicaciones infecciosas

Las infecciones constituyen otro riesgo importante en pacientes sometidos a *ECMO*, debido a la necesidad de accesos vasculares de gran calibre y la exposición prolongada a dispositivos invasivos. La manipulación frecuente del circuito, junto con la inmunosupresión inherente a la

enfermedad crítica, aumenta la vulnerabilidad del paciente frente a microorganismos patógenos.

Las infecciones más comunes incluyen bacteriemias asociadas a catéter, neumonía asociada a ventilador, sepsis del circuito y infecciones en los sitios de canulación o heridas quirúrgicas. Para prevenirlas, se deben aplicar protocolos estrictos de asepsia y antisepsia, realizar curaciones estériles, cambiar apósitos según las guías de control de infecciones y evitar el uso indiscriminado de antibióticos, priorizando la administración dirigida según cultivos y sensibilidad bacteriana.

La identificación precoz de signos de infección (fiebre, leucocitosis, incremento del lactato, cambios hemodinámicos o alteraciones en el oxigenador) permite un tratamiento oportuno, reduciendo las tasas de morbilidad asociadas.

Complicaciones neurológicas

El sistema nervioso central puede verse comprometido durante la terapia ECMO por múltiples mecanismos, entre ellos hipoxia cerebral, hipotensión prolongada, microembolias, hemorragias intracraneales o alteraciones metabólicas. Estas complicaciones neurológicas pueden manifestarse como convulsiones, alteración del nivel de conciencia, déficit motor o coma, y suelen tener un impacto negativo en el pronóstico global del paciente.

Los pacientes pediátricos y neonatales presentan una especial vulnerabilidad a estas complicaciones debido a la inmadurez de su sistema nervioso y la dificultad para evaluar los síntomas de forma clínica. Por ello, se recomienda realizar *monitorización neurológica continua, valorar la perfusión cerebral mediante ecografía Doppler o espectroscopía infrarroja (NIRS)*, y utilizar neuroimágenes (TAC o resonancia magnética) ante cualquier sospecha de daño neurológico. La prevención y detección temprana son fundamentales para reducir las secuelas neurológicas a largo plazo.

Complicaciones hemodinámicas y metabólicas

El soporte con ECMO produce cambios significativos en la fisiología hemodinámica y metabólica del paciente. En la *modalidad venoarterial (VA)*, el flujo extracorpóreo puede modificar la precarga y la poscarga cardíaca, lo que afecta la función ventricular y puede generar fenómenos como distensión del ventrículo izquierdo o isquemia coronaria si no se controla adecuadamente.

Asimismo, pueden presentarse alteraciones metabólicas como hemólisis (destrucción de eritrocitos) por fricción mecánica, desequilibrios electrolíticos, acidosis metabólica, disfunción renal o hepática y variaciones en la glucemia. Estas alteraciones requieren un monitoreo continuo del estado ácido-base, del balance hídrico, de la función renal y hepática, así como ajustes frecuentes en la nutrición, ventilación y soporte farmacológico. La vigilancia hemodinámica avanzada permite optimizar el flujo del circuito y preservar la perfusión de órganos vitales.

Complicaciones relacionadas con el manejo humano

Una proporción importante de las complicaciones asociadas al ECMO se relaciona con el factor humano, más que con el paciente o el equipo. Los errores en la manipulación del circuito, las dosis incorrectas de medicación, la falta de comunicación entre profesionales, el cansancio del personal o la omisión de protocolos establecidos son causas frecuentes de eventos adversos prevenibles.

La capacitación continua, el uso sistemático de listas de verificación (checklists) antes y durante los procedimientos, y la implementación de una comunicación efectiva y estructurada entre los miembros del equipo multidisciplinario son estrategias fundamentales para reducir estos errores. La seguridad del paciente en ECMO no depende únicamente de la tecnología, sino del compromiso, coordinación y disciplina del equipo de salud que la maneja.

PREVENCIÓN DE COMPLICACIONES EN LA ECMO

La prevención de complicaciones en los pacientes sometidos a terapia con ECMO constituye uno de los pilares más relevantes para garantizar la seguridad del procedimiento y optimizar los resultados clínicos. Dado que se trata de una técnica altamente compleja, invasiva y dependiente de tecnología especializada, requiere de un estricto control de cada una de sus etapas, desde la selección del paciente hasta la desconexión del sistema. La adecuada implementación de protocolos estandarizados, el seguimiento continuo y la formación de un equipo multidisciplinario experimentado son factores determinantes para reducir la incidencia de eventos adversos.

La mayoría de las complicaciones asociadas a ECMO pueden evitarse mediante una evaluación integral previa, una preparación óptima del paciente, un monitoreo minucioso durante la terapia y una coordinación efectiva del personal sanitario. El enfoque preventivo no solo busca minimizar los riesgos inherentes, sino también promover la recuperación fisiológica y funcional del paciente crítico.

Selección adecuada del paciente

El primer paso para prevenir complicaciones en ECMO es seleccionar bien al paciente. No todas las personas con insuficiencia respiratoria o cardíaca son candidatas adecuadas, por lo que la evaluación debe hacerse de forma individual valorando si los beneficios superan los riesgos. Es importante revisar el estado hemodinámico y la función cardiovascular para detectar hipotensión que no responde al tratamiento o una disfunción ventricular grave, así como evaluar la situación neurológica y descartar daños irreversibles. También se deben revisar los parámetros de coagulación para identificar trombocitopenia o coagulopatías y valorar si existe un fallo multiorgánico avanzado que podría limitar la recuperación. Antes de realizar la canulación es fundamental corregir problemas como la hipotensión severa, la acidosis o la hipoxia prolongada, ya que un paciente más estable tolera mejor el procedimiento. Una preparación cuidadosa antes de iniciar el ECMO ayuda a reducir complicaciones tanto inmediatas como posteriores.

Protocolos estandarizados y equipo especializado

La terapia con *ECMO* es un procedimiento de alta complejidad técnica y clínica, que requiere una coordinación precisa entre múltiples profesionales sanitarios y un entorno hospitalario dotado de recursos especializados. Por este motivo, la *ECMO* debe implementarse exclusivamente en centros con experiencia comprobada, donde existan protocolos clínicos actualizados, guías de actuación basadas en la evidencia y un equipo multidisciplinario debidamente entrenado. La concentración de casos en unidades de referencia no solo mejora los resultados clínicos, sino que también reduce la incidencia de complicaciones relacionadas con la falta de experiencia o de infraestructura.

La estandarización de los procedimientos mediante el uso de listas de verificación (checklists) es una herramienta fundamental para garantizar la seguridad del paciente y la uniformidad en la práctica clínica. Estas listas se aplican en todas las fases del proceso: la preparación del material y verificación del circuito, la canulación del paciente, el inicio del flujo extracorpóreo y el monitoreo continuo durante el soporte. Su implementación permite reducir errores humanos, mejorar la comunicación entre los miembros del equipo y asegurar que cada paso se ejecute bajo condiciones óptimas de seguridad y asepsia.

El equipo interdisciplinario de *ECMO* suele estar formado por intensivistas, cirujanos cardiovasculares, perfusionistas, enfermería especializada, fisioterapeutas y técnicos biomédicos, cada uno con responsabilidades específicas. Los intensivistas se encargan de supervisar la estabilidad hemodinámica, respiratoria y metabólica del paciente y coordinan las decisiones clínicas. Los cirujanos o especialistas en canulación realizan el acceso vascular y colocan o retiran el sistema cuando es necesario. Los perfusionistas controlan el circuito, ajustan los flujos, la oxigenación y las presiones y se aseguran de que el equipo funcione de manera segura. El personal de enfermería mantiene una vigilancia continua, detecta complicaciones de forma temprana, administra tratamientos y registra todas las intervenciones. Los fisioterapeutas apoyan la movilización precoz y el mantenimiento de la función muscular y los técnicos biomédicos garantizan el mantenimiento y la revisión de los equipos para que trabajen correctamente.

Una comunicación permanente, clara y estructurada entre todos los integrantes del equipo es indispensable para la toma de decisiones rápida y coordinada. La documentación exhaustiva de cada intervención y de los parámetros del sistema permite mantener la trazabilidad del proceso y facilita la identificación de áreas de mejora en la atención.

La formación continua constituye otro pilar esencial para el mantenimiento de la competencia técnica y la seguridad del paciente. Los programas de capacitación deben incluir simulaciones de emergencia, entrenamientos periódicos en resolución de fallos mecánicos, manejo de crisis clínicas y actualización en guías internacionales (como las publicadas por ELSO). Asimismo, la revisión retrospectiva de casos clínicos, análisis de incidentes y sesiones de retroalimentación multidisciplinaria contribuyen a reforzar la cultura de seguridad y a promover la mejora continua de los procesos asistenciales.

En este contexto, la creación de un comité o programa institucional de *ECMO* permite coordinar las actividades del equipo, estandarizar los protocolos, garantizar la disponibilidad de recursos y evaluar de manera continua los resultados clínicos. Este enfoque sistemático asegura que la atención proporcionada sea segura, eficiente y alineada con las mejores prácticas internacionales.

El éxito de la terapia *ECMO* no depende únicamente de la tecnología empleada, sino del nivel de preparación, cohesión y experiencia del equipo humano. La combinación de entrenamiento continuo, comunicación efectiva y protocolos estandarizados constituye la base para ofrecer un soporte extracorpóreo de alta calidad, minimizando los riesgos y optimizando la supervivencia y recuperación del paciente crítico.

Prevención de complicaciones hemorrágicas y trombóticas¹³

El equilibrio entre la anticoagulación efectiva y la prevención de eventos hemorrágicos representa uno de los mayores desafíos en la terapia con *ECMO*. Dado que el circuito extracorpóreo implica contacto continuo entre la sangre y superficies artificiales, se produce una activación constante del sistema de coagulación y de la cascada inflamatoria. Por ello, la anticoagulación controlada es imprescindible para prevenir la formación de trombos intraluminales, la obstrucción del circuito o la disfunción del oxigenador. Sin embargo, este mismo tratamiento incrementa el riesgo de hemorragias graves, tanto a nivel del sitio de canulación como en localizaciones críticas como el sistema nervioso central o el tubo digestivo.

El anticoagulante más utilizado en *ECMO* es la heparina sódica no fraccionada, debido a su efecto rápido, su reversibilidad mediante protamina y la amplia experiencia clínica acumulada. La dosis inicial y los ajustes posteriores deben individualizarse según el tipo de *ECMO*, la edad del paciente, el riesgo hemorrágico y los valores obtenidos en las pruebas de coagulación.

Para ajustar la anticoagulación durante el *ECMO* se utilizan varias pruebas de monitorización. El *ACT* permite una medición rápida a pie de cama y suele mantenerse entre 180 y 220 segundos según cada protocolo. El tiempo parcial de tromboplastina activado ayuda a evaluar la inhibición de la vía intrínseca de la coagulación y ofrece un control más preciso de la intensidad anticoagulante. El nivel de anti factor X mide de forma directa la actividad de la heparina y es especialmente útil en pacientes con trastornos de la coagulación o respuestas poco habituales al tratamiento.

El control combinado de estos parámetros, junto con la observación clínica continua, resulta esencial para detectar precozmente desviaciones significativas. La vigilancia del sitio de inserción de las cánulas, la presencia de sangrado en mucosas o drenajes, la aparición de hematomas o la caída del hematocrito son signos que deben ser valorados de forma inmediata para ajustar el tratamiento anticoagulante.

Además del uso de anticoagulantes, existen medidas adicionales que ayudan a prevenir la formación de coágulos¹⁴ y a mantener el sistema *ECMO* funcionando correctamente. Es importante asegurar un flujo sanguíneo adecuado dentro del circuito para evitar zonas de estasis donde puedan formarse trombos. También se debe eliminar cualquier burbuja de aire y purgar bien el sistema, ya que el aire puede dañar el endotelio y favorecer la agregación de plaquetas. De forma regular se revisan el oxigenador, las cánulas y las conexiones para detectar signos tempranos de fibrina, depósitos trombóticos o cambios en la presión que indiquen un posible fallo. Si algún componente muestra deterioro u obstrucción debe reemplazarse de inmediato para evitar complicaciones graves o interrupciones del soporte.

El manejo integral de la anticoagulación debe realizarse en estrecha coordinación entre intensivistas, perfusionistas, hematólogos y personal de enfermería especializado. El objetivo no es solo mantener la permeabilidad del circuito, sino también garantizar la seguridad hemodinámica del paciente y reducir al mínimo los eventos adversos hemorrágicos.

En los últimos años se han introducido nuevas estrategias y alternativas farmacológicas, como el uso de bivalirudina en pacientes con trombocitopenia inducida por heparina o con respuesta impredecible a la heparina convencional. Asimismo, los avances en la biocompatibilidad de los materiales del circuito han permitido disminuir la necesidad de anticoagulación intensa, contribuyendo a un mejor balance entre eficacia y seguridad.

Prevención de infecciones

Las infecciones constituyen una de las principales causas de morbilidad y mortalidad en los pacientes sometidos a terapia con *ECMO*. Este riesgo elevado se debe, principalmente, a la presencia prolongada de dispositivos invasivos —como cánulas de gran calibre, catéteres venosos y arteriales, drenajes y sondas—, así como a la exposición continua del paciente a un entorno hospitalario altamente complejo. La condición crítica del enfermo, la alteración de las barreras cutáneas y mucosas y el uso frecuente de inmunosupresores o antibióticos de amplio espectro contribuyen a aumentar la susceptibilidad a infecciones locales y sistémicas.

La implementación estricta de normas de asepsia y anti-sepsia en todas las etapas del manejo es fundamental para reducir este riesgo. La manipulación del circuito extracorpóreo debe realizarse bajo condiciones de esterilidad controlada, limitando las intervenciones innecesarias y garantizando que cada procedimiento se efectúe siguiendo los protocolos establecidos por el centro.

Las medidas preventivas para evitar infecciones en pacientes con *ECMO* se basan en un cuidado riguroso de los puntos de acceso y del circuito. Es fundamental realizar curaciones estériles diarias en las zonas donde están insertadas las cánulas, usando una técnica aséptica estricta con antisépticos como la clorhexidina y apósitos transparentes que permitan ver el sitio de inserción. También es importante manipular lo menos posible el circuito, ya que cada movimiento o desconexión aumenta el riesgo de contaminación, por

lo que solo debe intervenir cuando sea realmente necesario y siempre por personal entrenado. Los apósitos y conexiones deben cambiarse siguiendo los intervalos recomendados por los protocolos del centro o por guías internacionales, garantizando que todos los materiales se mantengan en buen estado. La higiene de manos debe ser estricta antes y después de cualquier procedimiento, utilizando soluciones hidroalcohólicas o lavado con agua y jabón. Además, cada día se debe valorar si los catéteres y otros accesos invasivos siguen siendo necesarios y retirarlos en cuanto dejen de ser esenciales para reducir el riesgo de infecciones asociadas a dispositivos.

Además de estas medidas básicas, es esencial contar con un programa de vigilancia microbiológica activa, que incluya el seguimiento de cultivos, la identificación temprana de microorganismos multirresistentes y la monitorización de indicadores de infección en pacientes con *ECMO*. La detección precoz de fiebre, alteraciones hemodinámicas, elevación de marcadores inflamatorios (PCR, procalcitonina) o cambios locales en el punto de inserción debe activar protocolos de diagnóstico y tratamiento inmediato.

El inicio oportuno de terapia antimicrobiana dirigida, basado en los resultados de los cultivos y la evaluación del estado clínico, permite evitar la progresión hacia cuadros de sepsis o shock séptico. Sin embargo, debe procurarse un uso racional de antibióticos, evitando la sobreexposición y la generación de resistencias, en coordinación con los servicios de microbiología y enfermedades infecciosas.

Asimismo, el rol del personal de enfermería y perfusionistas es determinante en la prevención de infecciones. Su vigilancia constante, la observación detallada de los puntos de acceso y la comunicación efectiva con el resto del equipo multidisciplinar facilitan la detección temprana de complicaciones. La formación continua en prácticas seguras, manejo estéril y protocolos de control de infecciones constituye una herramienta clave para garantizar la seguridad del paciente durante todo el periodo de soporte extracorpóreo.

La vigilancia microbiológica continua y la detección temprana de signos de infección permiten iniciar tratamientos antibióticos de forma oportuna y evitar sepsis asociadas a dispositivos.

Prevención de complicaciones mecánicas

El soporte con *ECMO* depende de un sistema tecnológico altamente sofisticado que combina componentes mecánicos, eléctricos y biológicos. Por ello, las complicaciones mecánicas representan un riesgo potencialmente letal, capaz de comprometer la eficacia del tratamiento y la seguridad del paciente en cuestión de segundos. La prevención y detección temprana de estos eventos requieren una vigilancia continua, un mantenimiento riguroso del equipo y una formación especializada del personal sanitario.

Entre las fallas mecánicas más frecuentes se incluyen la rotura o desconexión de los circuitos, la embolia gaseo-

sa, el malfuncionamiento de la bomba centrífuga o del oxigenador, así como la obstrucción o colapso de las líneas venosa o arterial. Estos problemas pueden originarse por desgaste de los materiales, defectos técnicos, manipulación inadecuada o alteraciones en la presión y el flujo del sistema. La inspección regular de cada componente del circuito es, por tanto, una medida esencial de seguridad.

Las inspecciones técnicas periódicas deben incluir la verificación minuciosa de la integridad del circuito, asegurando la ausencia de fugas, burbujas, conexiones sueltas o signos de deterioro en las líneas de conducción. La observación de cambios en la presión diferencial del oxigenador, la aparición de ruidos inusuales, vibraciones o alarmas del sistema, así como variaciones inesperadas del flujo extracorpóreo, deben considerarse señales de alarma que justifican una evaluación inmediata por parte del equipo ECMO.

Además, la monitorización continua de los parámetros del sistema, incluyendo la presión pre y post-oxigenador, la temperatura, la velocidad de la bomba y la saturación del gas barrido, permite identificar desviaciones antes de que se traduzcan en un fallo clínico. La documentación sistemática de estos valores y su correlación con el estado hemodinámico del paciente facilitan una respuesta rápida ante cualquier anomalía.

Un aspecto clave en la prevención es la existencia de equipos de respaldo y fuentes de energía alternativas. Se recomienda contar con oxigenadores, bombas y módulos de control de repuesto, así como baterías de emergencia que garanticen la continuidad del soporte ante cortes eléctricos o fallas del suministro central. Del mismo modo, disponer de un plan de contingencia estructurado y de protocolos de emergencia específicos incluyendo el reemplazo rápido del oxigenador o la conversión a ventilación mecánica convencional es fundamental para minimizar el tiempo de interrupción del soporte vital.

La formación continua del personal sanitario y técnico que opera el sistema ECMO resulta determinante. El entrenamiento mediante simulaciones clínicas de fallas mecánicas (por ejemplo, rotura de circuito, entrada de aire o pérdida súbita de flujo) permite reforzar la capacidad de respuesta del equipo y disminuir la incidencia de errores humanos. Estas prácticas, combinadas con una cultura de seguridad activa y comunicación efectiva entre los miembros del equipo, garantizan una intervención coordinada y eficaz ante situaciones críticas.

En resumen, la prevención de complicaciones mecánicas en ECMO se basa en tres pilares esenciales: mantenimiento técnico preventivo, monitorización constante de parámetros del circuito y capacitación continua del personal. Solo la integración de estos elementos permite asegurar la fiabilidad del sistema, mantener la estabilidad del paciente y preservar la eficacia del soporte vital extracorpóreo.

Monitoreo neurológico y hemodinámico

La monitorización neurológica y hemodinámica constituye un pilar fundamental en la atención integral del paciente en soporte con ECMO. Dado que esta terapia implica la manipulación extracorpórea del flujo sanguíneo y modificacio-

nes significativas en la fisiología cardiovascular y cerebral, una vigilancia estrecha y continua permite detectar precozmente alteraciones críticas, prevenir complicaciones graves y optimizar la perfusión tisular sistémica y cerebral.

En cuanto al monitoreo hemodinámico, es esencial mantener una *presión arterial media (PAM)* adecuada al perfil del paciente, garantizando un flujo cerebral y sistémico suficiente. Para ello, se emplean catéteres arteriales invasivos que permiten una medición continua de la presión arterial, así como la valoración del gasto cardíaco y la resistencia vascular sistémica mediante técnicas avanzadas (por ejemplo, termodilución o ecocardiografía transesofágica). La estabilidad hemodinámica depende tanto del flujo del circuito ECMO como del funcionamiento residual del corazón del paciente, por lo que el ajuste del flujo extracorpóreo debe realizarse de forma individualizada, evitando fluctuaciones bruscas que puedan comprometer la perfusión cerebral o favorecer el desarrollo de edema.

Los controles seriados de gases arteriales, *saturación venosa mixta SvO₂* y niveles de lactato sérico son indicadores clave del equilibrio entre aporte y consumo de oxígeno. Un incremento sostenido del lactato o una disminución de la SvO₂ pueden reflejar hipoperfusión o fallo del intercambio gaseoso, requiriendo ajustes en el flujo, la oxigenación o la ventilación del paciente. Del mismo modo, la temperatura corporal debe mantenerse dentro de rangos fisiológicos, ya que la hipotermia o la hipertermia pueden modificar la demanda metabólica y afectar la autorregulación cerebral.

El monitoreo neurológico adquiere especial relevancia debido al riesgo de complicaciones como hipoxia cerebral, isquemia, embolias o hemorragias intracraneales, potencialmente devastadoras. Se recomienda la evaluación neurológica frecuente mediante la valoración del nivel de conciencia, reflejos pupilares y respuesta motora, complementada por herramientas instrumentales no invasivas. El *electroencefalograma (EEG)* continuo permite la detección precoz de crisis epilépticas subclínicas o alteraciones de la actividad cortical relacionadas con hipoxia o hipoperfusión. Asimismo, la oximetría cerebral por espectroscopia cercana al infrarrojo (NIRS) constituye una técnica útil para monitorizar la saturación regional de oxígeno en el tejido cerebral, facilitando una intervención temprana ante episodios de desaturación o desequilibrio hemodinámico.

En población pediátrica y neonatal, el riesgo de complicaciones neurológicas es particularmente alto debido a la inmadurez del sistema nervioso central y a la fragilidad vascular. En estos casos, la ecografía transfontanelar o ecografía cerebral se considera una herramienta de gran valor para la detección precoz de lesiones estructurales, hemorragias intraventriculares o infartos silentes, que pueden pasar desapercibidos clínicamente. La realización seriada de estos estudios permite identificar alteraciones en etapas iniciales y adoptar medidas terapéuticas o preventivas que mejoren el pronóstico neurológico a largo plazo.

El abordaje integral del monitoreo neurológico y hemodinámico en ECMO debe combinar la tecnología avanzada

con una observación clínica sistemática y un trabajo coordinado del equipo multidisciplinar. La interpretación dinámica de los datos obtenidos y su correlación con el estado clínico del paciente resultan esenciales para minimizar los riesgos y optimizar los resultados funcionales. En este sentido, la formación del personal en la identificación de signos precoces de deterioro y en la respuesta rápida ante eventos adversos constituye un elemento crítico dentro de la cultura de seguridad del paciente en programas ECMO.

Prevención de errores humanos y fortalecimiento de la cultura de seguridad

Un porcentaje significativo de las complicaciones asociadas a la terapia ECMO no se debe exclusivamente a fallos técnicos del equipo, sino a errores humanos, deficiencias en la comunicación o falta de coordinación entre los miembros del equipo multidisciplinario. Dado el alto grado de complejidad y el margen limitado para el error en este tipo de soporte vital, fomentar una cultura de seguridad hospitalaria sólida es un componente esencial para garantizar la calidad asistencial y reducir la incidencia de eventos adversos.

Promover esta cultura implica establecer un entorno de comunicación abierta, transparente y bidireccional, donde todos los profesionales involucrados —médicos, enfermería, perfusionistas, fisioterapeutas y técnicos biomédicos— puedan expresar inquietudes, dudas o errores detectados sin temor a represalias. La notificación voluntaria y no punitiva de incidentes permite analizar las causas raíz de los errores y aplicar medidas preventivas, en lugar de centrarse únicamente en la atribución de responsabilidades individuales. Este enfoque, orientado al aprendizaje organizacional, favorece la confianza, la colaboración y la mejora continua.

El trabajo colaborativo interdisciplinar es otro pilar de la seguridad en ECMO. La toma de decisiones en equipo, las reuniones de coordinación y las sesiones de pase clínico estructurado contribuyen a alinear criterios, unificar objetivos y anticipar posibles riesgos. En este sentido, la implementación de protocolos estandarizados y guías clínicas basadas en la evidencia asegura la coherencia en la atención y reduce la variabilidad en la práctica clínica, factores directamente relacionados con la seguridad del paciente.

Las simulaciones clínicas de crisis constituyen una herramienta formativa de gran valor para el entrenamiento del personal en situaciones de emergencia, como fallas del oxigenador, embolia aérea, parada cardiorrespiratoria o pérdida de flujo. Estas actividades permiten reproducir escenarios de alta presión en un entorno controlado, fortalecer la capacidad de respuesta del equipo, mejorar la coordinación y afianzar los protocolos de actuación rápida. Asimismo, la revisión sistemática de casos previos, auditorías internas y análisis de incidentes críticos ofrecen información valiosa para identificar puntos débiles en el sistema y orientar estrategias de mejora continua.

La actualización permanente de los protocolos clínicos y de seguridad, en función de las nuevas evidencias científicas y de las recomendaciones internacionales (como las de la *Extracorporeal Life Support Organization*, ELSO), es otro ele-

mento clave para mantener la excelencia asistencial. Estas revisiones deben realizarse de manera periódica, incorporando la experiencia adquirida en el propio centro y adaptando los procedimientos a las necesidades específicas de cada unidad.

Por último, el registro detallado, sistemático y continuo de todas las acciones realizadas durante el soporte ECMO, incluyendo parámetros técnicos, ajustes del circuito, incidencias y observaciones clínicas, permite un seguimiento preciso de la evolución del paciente y una detección temprana de desviaciones en el tratamiento. Este registro constituye, además, una fuente de datos esencial para la evaluación de resultados, la investigación clínica y la mejora de los procesos asistenciales.

En conjunto, la consolidación de una cultura de seguridad centrada en el aprendizaje, la comunicación y la estandarización de prácticas es fundamental para reducir los errores humanos, fortalecer la cohesión del equipo y garantizar una atención segura, eficaz y de calidad a los pacientes sometidos a terapia ECMO.

ROL DEL ENFERMERO PERFUSIONISTA: COMPETENCIAS Y HUMANIZACIÓN DEL CUIDADO

El enfermero perfusionista constituye una figura esencial dentro del equipo multidisciplinario que atiende a pacientes críticos sometidos a ECMO u otros sistemas de soporte vital extracorpóreo. Su función trasciende el manejo técnico del circuito, abarcando una serie de competencias científicas, clínicas, éticas, comunicacionales y humanas, cuyo propósito es garantizar la seguridad del paciente, optimizar la eficacia del tratamiento y preservar la dignidad y los valores de la persona atendida.

En un entorno altamente tecnificado como la terapia ECMO, el perfusionista actúa como un mediador entre la biotecnología y el cuidado humanizado, integrando el conocimiento científico con la sensibilidad del cuidado enfermero. Su desempeño se basa en la precisión técnica, la toma de decisiones clínicas en tiempo real y el acompañamiento empático hacia el paciente y su entorno familiar.

Formación y perfil profesional

El perfil del enfermero perfusionista se sustenta en una formación sólida y multidisciplinaria que incluye conocimientos avanzados en fisiología cardiovascular y pulmonar, farmacología, biotecnología médica, hematología, y cuidados críticos. Además, debe poseer destrezas en análisis clínico, gestión del riesgo y liderazgo sanitario.

Su rol implica operar, mantener y supervisar el sistema extracorpóreo que permite la oxigenación y eliminación de dióxido de carbono fuera del organismo. El perfusionista vigila los parámetros hemodinámicos, metabólicos y respiratorios, interpretando los datos en tiempo real y realizando los ajustes necesarios de forma coordinada con el equipo médico. Esta tarea requiere alta concentración, precisión, pensamiento crítico y capacidad resolutoria inmediata, especialmente ante cambios súbitos en el estado clínico del paciente o ante fallas del sistema.

De esta manera, el enfermero perfusionista combina la competencia técnica con la responsabilidad ética y el juicio clínico, siendo un profesional capaz de actuar con autonomía dentro de un marco interdisciplinario de colaboración.

Competencias técnicas

Las competencias técnicas del perfusionista son fundamentales porque su trabajo se basa en conocer a fondo el circuito extracorpóreo y todos sus componentes. Entre sus tareas principales están preparar y purgar el circuito *ECMO* asegurando que esté íntegro y estéril, comprobar que la bomba, el oxigenador, el intercambiador de calor, las cánulas y los sensores funcionen correctamente y ajustar los flujos sanguíneos y de gas según las necesidades del paciente. También debe detectar y solucionar cualquier fallo o alarma del sistema, supervisar la anticoagulación para evitar trombos o sangrados y participar en la colocación, mantenimiento y retirada del soporte. Todo esto requiere mucha atención, habilidad y coordinación porque incluso pequeños errores pueden poner en riesgo la vida del paciente. Además, el perfusionista debe estar preparado para actuar ante emergencias tecnológicas siguiendo los protocolos de contingencia y manteniendo siempre la seguridad del paciente como prioridad.

Competencias científicas y de gestión del conocimiento

El desempeño del enfermero perfusionista se fundamenta en la medicina y enfermería basadas en la evidencia, lo que implica una práctica reflexiva, crítica y sustentada en la investigación. Su formación científica le permite comprender los principios fisiológicos que rigen la interacción entre el organismo y la máquina, interpretar variables bioquímicas, hemodinámicas y gasométricas, y ajustar los parámetros del circuito en función del estado clínico.

Además, elaboración y actualización de protocolos clínicos y de seguridad, capacitación de los profesionales, investigación y desarrollo tecnológico en soporte extracorpóreo y evalúa la calidad asistencial y gestión de riesgos.

De esta forma, el perfusionista se convierte en un agente activo en la mejora continua de la práctica clínica y en la innovación en cuidados críticos, contribuyendo al avance del conocimiento en perfusión y *ECMO*.

Competencias humanas, éticas y relacionales

El aspecto humano del rol del perfusionista es tan importante como su habilidad técnica. El paciente conectado a *ECMO* suele encontrarse en una situación extrema, vulnerable y dependiente de la tecnología para sobrevivir. En este contexto, el enfermero perfusionista debe reconocer a la persona detrás del dispositivo, manteniendo una actitud empática, respetuosa y comprometida con su bienestar integral.

Las competencias éticas del profesional se basan en actuar siempre buscando el beneficio del paciente, evitando causar daño y garantizando un cuidado justo y equitativo para todos. También incluyen respetar la autonomía del paciente y de su familia, teniendo en cuenta sus decisiones siempre que la situación clínica lo permita.

Asimismo, la comunicación efectiva es una herramienta esencial del cuidado humanizado. El perfusionista debe ser capaz de explicar de forma clara y comprensible los procedimientos y participar activamente en el acompañamiento emocional del paciente y sus seres queridos. Su presencia constante, su escucha activa y su disposición a brindar apoyo contribuyen a disminuir la ansiedad, el miedo y la incertidumbre que suelen acompañar estos procesos críticos.

Humanización del cuidado en contextos tecnificados

La humanización del cuidado en *ECMO* implica devolver sentido humano a un entorno dominado por la tecnología. La presencia de múltiples dispositivos, alarmas y equipos puede generar despersonalización, haciendo que el paciente se perciba como un "cuerpo conectado a máquinas". El enfermero perfusionista tiene la misión de restaurar la individualidad del paciente y de convertir la tecnología en una herramienta al servicio del bienestar, no en su protagonista.

Humanizar significa reconocer las dimensiones físicas, psicológicas, sociales y espirituales del enfermo, y procurar su bienestar integral a través de pequeños gestos de atención, palabras de aliento, cuidados del confort y respeto por la intimidad. El perfusionista, desde su rol junto al circuito, es también un cuidador cercano que observa, escucha y acompaña, garantizando que la vida que protege mantenga su valor y dignidad.

Trabajo en equipo y liderazgo profesional

El enfermero perfusionista es un enlace técnico y comunicativo dentro del equipo multidisciplinario conformado por intensivistas, cirujanos, cardiólogos, enfermeros clínicos, fisioterapeutas y técnicos biomédicos. Su rol coordinador facilita la integración de esfuerzos y la coherencia en las decisiones clínicas.

Además, asume funciones de liderazgo clínico, promoviendo la cultura de seguridad, la prevención de errores y la mejora continua. Su experiencia técnica lo convierte en una figura de referencia para la resolución de problemas y la gestión de crisis. Participa en comités de calidad, docencia e investigación, fortaleciendo el desarrollo profesional de las unidades de cuidados intensivos.

Síntesis y reflexión final

El rol del enfermero perfusionista en la terapia *ECMO* es una fusión entre la ciencia, la técnica y la humanidad. Su misión no se limita a mantener el funcionamiento de una máquina, sino a garantizar que el soporte vital extracorpóreo se integre de manera ética y humana al proceso de cuidado. Su trabajo representa la unión entre el conocimiento tecnológico más avanzado y el compromiso con la vida, la compasión y el respeto por la persona.

El perfusionista, mediante su competencia profesional, vocación de servicio y sensibilidad humana, encarna la esencia del cuidado moderno: un cuidado tecnológicamente competente, científicamente fundamentado y pro-

fundamente humano. Su aporte no solo salva vidas, sino que también dignifica la experiencia del paciente crítico, recordando que incluso en los entornos más tecnificados, el centro del cuidado sigue siendo la persona.

FORMACIÓN Y CULTURA DE SEGURIDAD EN EL CONTEXTO DE ECMO

La formación continua y el desarrollo de una cultura de seguridad son elementos esenciales para garantizar un cuidado seguro y de calidad en los pacientes que reciben ECMO. Este procedimiento es altamente complejo, tanto desde el punto de vista técnico como clínico, por lo que requiere que todos los profesionales del equipo, incluidos médicos, enfermeros, perfusionistas y otros especialistas, tengan conocimientos actualizados, habilidades específicas y actúen en un entorno donde la seguridad del paciente sea siempre la prioridad. La combinación de formación constante y una cultura de seguridad sólida contribuye directamente a prevenir complicaciones y mejorar los resultados clínicos.

Importancia de la formación continua

La tecnología y los protocolos asociados al ECMO evolucionan constantemente, por lo que los profesionales deben mantenerse siempre actualizados. La formación continua permite que el equipo adquiera y refuerce las competencias técnicas y clínicas necesarias para manejar de manera segura el circuito extracorpóreo y al paciente crítico. También facilita la incorporación de nuevos protocolos basados en la evidencia científica más reciente, y ayuda a desarrollar habilidades para identificar complicaciones de manera temprana y responder rápidamente ante situaciones de emergencia. Además, la formación fortalece la comunicación, el trabajo en equipo y la gestión de situaciones de estrés, aspectos fundamentales en un entorno crítico como el de la UCI. Este aprendizaje puede realizarse a través de cursos especializados, talleres, simulaciones clínicas, programas de educación virtual, y participación en congresos o seminarios nacionales e internacionales, siempre con el objetivo de mejorar la seguridad y la calidad del cuidado.

Cultura de seguridad: definición y componentes

La cultura de seguridad es el conjunto de valores, actitudes y comportamientos que fomentan un ambiente en el que la seguridad del paciente es una prioridad absoluta. En la práctica, esto significa que todos los miembros del equipo deben reconocer y reportar errores o eventos adversos sin temor a represalias, para que puedan aprender de ellos y mejorar continuamente. También implica trabajar de manera colaborativa respetando los roles y responsabilidades de cada profesional, aplicar los protocolos y estándares establecidos de forma rigurosa, mantener una comunicación abierta y clara, y dedicar recursos y tiempo a la prevención de riesgos. Una cultura de seguridad fuerte asegura que cada decisión y acción dentro del entorno crítico esté orientada a proteger la vida y la integridad del paciente.

Estrategias para fomentar la cultura de seguridad en ECMO

Para que la seguridad sea efectiva en el contexto del ECMO, se deben implementar acciones concretas y sistemáticas. Entre estas estrategias se incluyen el uso de listas de verificación o checklists, que garantizan que todos los pasos del procedimiento se realicen correctamente y sin omisiones. Los simulacros y entrenamientos en escenarios de emergencia permiten al equipo practicar la respuesta ante fallas técnicas o clínicas, mejorando la rapidez y la coordinación en situaciones reales. El análisis de eventos adversos y casi incidentes (near misses) permite identificar las causas de los problemas y diseñar mejoras para evitar que se repitan. Las reuniones interdisciplinarias periódicas fortalecen la comunicación, la coordinación y la evaluación del desempeño del equipo, mientras que el liderazgo en seguridad asegura que haya responsables que impulsen buenas prácticas y apoyen al personal en todo momento. Todas estas acciones trabajan de manera conjunta para consolidar una cultura de seguridad efectiva.

Impacto de la formación y la cultura de seguridad en los resultados clínicos

La evidencia científica demuestra que los equipos que reciben formación continua y trabajan en un entorno con cultura de seguridad sólida obtienen mejores resultados. Esto se traduce en una reducción de complicaciones relacionadas con el ECMO, como hemorragias, trombosis e infecciones. Además, permite una detección más rápida y un manejo más efectivo de fallas técnicas o situaciones clínicas críticas, aumentando la seguridad del paciente. También mejora la satisfacción y confianza de los pacientes y sus familias, quienes perciben un cuidado seguro y coordinado. Finalmente, contribuye a disminuir la mortalidad y a mejorar la calidad de vida de los pacientes tras recibir ECMO, demostrando que la formación y la seguridad no son solo conceptos abstractos, sino factores clave que impactan directamente en la salud y el bienestar de quienes reciben este tratamiento complejo.

INNOVACIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS EN ECMO

La ECMO ha experimentado una evolución significativa en los últimos años, consolidándose como una herramienta fundamental en el manejo del paciente crítico con fracaso cardiorrespiratorio refractario. Este progreso ha sido posible gracias a la combinación de avances tecnológicos, la mejora en la comprensión de la fisiopatología subyacente y el fortalecimiento de los equipos multidisciplinares especializados en soporte vital extracorpóreo. En la actualidad, la ECMO no solo se utiliza como tratamiento de rescate, sino también como una estrategia puente hacia la recuperación, el trasplante o la asistencia ventricular de larga duración.

Entre las innovaciones más destacadas se encuentra la miniaturización y portabilidad de los sistemas ECMO, que ha permitido ampliar su uso a contextos extrahospitalarios, misiones de transporte interhospitalario e incluso situa-

ciones de emergencia prehospitalaria. Los nuevos dispositivos incorporan bombas centrífugas con menor generación de calor y menor riesgo de hemólisis, así como membranas oxigenadoras con materiales más biocompatibles, capaces de mantener una adecuada oxigenación durante periodos prolongados sin comprometer la seguridad del paciente. La reducción del tamaño y la complejidad de los equipos también ha favorecido su integración en unidades de cuidados intensivos con recursos limitados, mejorando el acceso al tratamiento.

Otro aspecto clave es la automatización y digitalización de los sistemas ECMO, que permiten una monitorización continua y precisa de variables críticas como el flujo, la presión y la saturación venosa. El desarrollo de plataformas integradas con sistemas de historia clínica electrónica facilita la trazabilidad de los datos, la identificación de tendencias y la prevención de eventos adversos. La inteligencia artificial (IA) y los algoritmos de aprendizaje automático están emergiendo como herramientas de apoyo a la toma de decisiones clínicas, capaces de predecir complicaciones, optimizar la duración del soporte y personalizar los parámetros del circuito según las características fisiológicas y la evolución del paciente.

En paralelo, la investigación en biocompatibilidad y anticoagulación continúa siendo un área prioritaria. Se están desarrollando recubrimientos heparinizados y polímeros avanzados que minimizan la activación del sistema inmunitario y la cascada de la coagulación, reduciendo así el riesgo de trombosis o hemorragia, dos de las complicaciones más temidas en ECMO. Además, se están evaluando estrategias farmacológicas individualizadas basadas en la monitorización viscoelástica, lo que permite un control más preciso de la anticoagulación y mejora la seguridad global del soporte.

La formación y capacitación del personal sanitario constituyen otro eje central de la innovación. El uso de simuladores clínicos de alta fidelidad permite reproducir situaciones críticas, optimizar la respuesta del equipo y reforzar la cultura de seguridad. Estas herramientas formativas favorecen la coordinación interdisciplinaria entre perfusionistas, intensivistas, cirujanos y enfermería, elemento esencial para el éxito del programa ECMO. Asimismo, se están implementando plataformas de telemedicina y realidad aumentada que facilitan la supervisión remota y la asistencia técnica en tiempo real, especialmente útil en centros en desarrollo o de menor volumen.

De cara al futuro, los esfuerzos se orientan hacia la sostenibilidad y equidad en el acceso a la terapia ECMO. La alta complejidad y el elevado coste del procedimiento plantean desafíos éticos y organizativos, especialmente en contextos de recursos limitados o durante crisis sanitarias como la pandemia por COVID-19. Por ello, la investigación actual busca optimizar la relación coste-beneficio, reducir la variabilidad entre centros y promover la creación de redes regionales ECMO que garanticen una atención estandarizada, segura y eficiente.

En resumen, las innovaciones tecnológicas, la integración digital, la formación avanzada y la investigación colaborativa marcan el futuro de la ECMO. La tendencia apunta hacia sistemas más seguros, automatizados y personalizados, ca-

paces de mejorar los resultados clínicos sin comprometer la seguridad del paciente. El desafío para los próximos años será equilibrar estos avances con la sostenibilidad del sistema sanitario y la consolidación de una cultura de seguridad y excelencia clínica en todos los niveles de atención.

CONCLUSIONES

La ECMO se consolida como una de las herramientas más avanzadas y complejas dentro del soporte vital extracorpóreo, ofreciendo una alternativa terapéutica eficaz en pacientes con insuficiencia respiratoria o cardíaca grave refractaria a los tratamientos convencionales. Esta técnica, al asumir temporalmente las funciones vitales del corazón y los pulmones, permite mantener la oxigenación y perfusión tisular mientras el organismo se recupera o se define una terapia definitiva, como el trasplante o la asistencia mecánica prolongada.

El principio fisiológico del ECMO se basa en la circulación extracorpórea controlada, donde la sangre se oxigena y depura de dióxido de carbono fuera del cuerpo, simulando la función pulmonar y, en algunos casos, la cardíaca. No obstante, el éxito de esta terapia no depende únicamente del funcionamiento técnico del sistema, sino del abordaje integral del paciente crítico, que requiere precisión científica, juicio clínico y una coordinación multidisciplinaria constante.

Las indicaciones y contraindicaciones del ECMO deben ser evaluadas cuidadosamente, priorizando casos potencialmente reversibles y evitando su uso en situaciones donde la irreversibilidad del daño o la falta de recursos lo conviertan en un tratamiento fútil. Una correcta selección del paciente y una preparación preoperatoria adecuada son factores determinantes para reducir complicaciones y optimizar los resultados clínicos.

La seguridad del paciente es un eje fundamental durante toda la terapia ECMO. La complejidad técnica, la necesidad de anticoagulación continua y la presencia de múltiples dispositivos invasivos hacen que la prevención, identificación y manejo temprano de las complicaciones sean responsabilidades compartidas por todo el equipo de salud. La vigilancia hemodinámica, el control riguroso de parámetros de coagulación, la prevención de infecciones, el mantenimiento mecánico del circuito y la comunicación efectiva entre los profesionales son pilares esenciales del cuidado seguro.

La prevención de complicaciones se sustenta en la implementación de protocolos estandarizados, la capacitación continua del personal y la existencia de equipos especializados con experiencia comprobada. Un enfoque preventivo no solo minimiza los riesgos inherentes al procedimiento, sino que también promueve la estabilidad fisiológica y la recuperación integral del paciente. La monitorización constante, la revisión sistemática del circuito, la aplicación de medidas de asepsia estricta y la detección precoz de alteraciones clínicas o técnicas son estrategias que reducen significativamente la morbimortalidad asociada al ECMO.

En este contexto, el rol del enfermero perfusionista adquiere una relevancia central. Este profesional no solo domina el manejo técnico del circuito extracorpóreo, sino que también actúa como un mediador entre la biotecnología y el cuidado humanizado. Su labor exige competencias técnicas, científicas y éticas de alto nivel, además de una sólida capacidad de trabajo en equipo, liderazgo y gestión del riesgo. El perfusionista encarna el equilibrio entre ciencia y humanidad, garantizando que el uso de la tecnología mantenga siempre como propósito esencial la preservación de la vida y la dignidad del paciente.

Asimismo, la humanización del cuidado en un entorno altamente tecnificado como la terapia *ECMO* es indispensable. El paciente conectado a un sistema extracorpóreo se encuentra en un estado de extrema vulnerabilidad, y el contacto humano, la empatía y el acompañamiento emocional son tan importantes como el manejo técnico del soporte. Humanizar significa reconocer la individualidad del paciente, atender sus necesidades emocionales y espirituales y garantizar que la tecnología esté al servicio del bienestar, no al revés.

La formación continua y la cultura de seguridad completan el marco que sustenta la excelencia en *ECMO*. La actualización constante de conocimientos, la capacitación mediante simulaciones clínicas y el aprendizaje basado en la evidencia fortalecen las competencias del equipo y favorecen la respuesta oportuna ante emergencias. Paralelamente, una cultura de seguridad sólida promueve la comunicación abierta, el reporte de incidentes sin represalias y la mejora continua de los procesos. Estas acciones conjuntas no solo reducen errores humanos y complicaciones, sino que también consolidan la confianza entre profesionales, pacientes y familias.

En síntesis, la práctica del *ECMO* representa una unión inseparable entre ciencia, tecnología y cuidado humano. Su efectividad depende tanto del dominio técnico y la precisión fisiológica como del compromiso ético y emocional de los profesionales que lo aplican. La integración de la formación permanente, la cultura de seguridad y la humanización del cuidado no solo optimiza los resultados clínicos, sino que también dignifica el ejercicio de la profesión sanitaria. En última instancia, el éxito del *ECMO* no reside únicamente en mantener la vida mediante la máquina, sino en hacerlo con calidad, humanidad y respeto por la persona en su totalidad.

BIBLIOGRAFIA/WEBGRAFIA

1. Brodie, D., & Bacchetta, M. (2011). Extracorporeal membrane oxygenation for ARDS in adults. *The New England Journal of Medicine*, 365(20), 1905–1914.
2. Cui, Y., et al. (2022). Venovenous vs. venoarterial extracorporeal membrane oxygenation in infection-associated severe PARDS patients. *Annals of Translational Medicine*, 10(12), 636. <https://doi.org/10.21037/atm-22-940>
3. Extracorporeal Life Support Organization. (2021). Guidelines for adult respiratory and cardiac ECMO. ELSO.
4. Finney, S. J., et al. (2014). Extracorporeal support for patients with acute respiratory failure: Physiology of the membrane lung. *European Respiratory Review*, 23, 379–389.
5. Haft, J. W., et al. (2019). Complications of ECMO in adults: Prevention and management. *Journal of Critical Care*, 50, 48–55.
6. Helms, J., Frère, C., Thiele, T., Tanaka, K. A., Neal, M. D., Steiner, M. E., Connors, J. M., & Levy, J. H. (2023). Anticoagulation in adult patients supported with extracorporeal membrane oxygenation: Guidance from the International Society on Thrombosis and Haemostasis. *Journal of Thrombosis and Haemostasis*, 21(2), 373–396. <https://doi.org/10.1111/jth.16292>
7. Karagiannidis, C., Brodie, D., Schneck, E., et al. (2019). Physiological and technical considerations of extracorporeal membrane oxygenation. *Critical Care*, 23, 236. <https://doi.org/10.1186/s13054-019-2367-z>
8. Lim, H. (2023). The physiology of extracorporeal membrane oxygenation: The Fick principle. *Perfusion*, 38(2), 236–244. <https://doi.org/10.1177/02676591211055971>
9. Manickavel, S. (2020). Pathophysiology of respiratory failure and physiology of gas exchange in extracorporeal membrane oxygenation. *Indian Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*. <https://doi.org/10.1007/s12055-020-01042-8>
10. Olson, S. R., Meyer, A. D., McCarty, O. J. T., Deloughery, T. G., & Shatzel, J. J. (2021). Thrombosis and bleeding in extracorporeal membrane oxygenation (ECMO). *Critical Care*, 25, 151. <https://doi.org/10.1186/s13054-021-03546-2>
11. World Health Organization. (2021). Patient safety curriculum guide: Multi-professional edition. WHO.
12. Pacheco Reyes, A. F., et al. (2024). Coagulation management in patients requiring extracorporeal membrane oxygenation. *Scientia Salutis*, 10, 45-55.
13. Gratz, J., et al. (2025). Anticoagulation during extracorporeal membrane oxygenation: Both thrombosis and bleeding are leading complications in patients undergoing ECMO. *British Journal of Anaesthesia*. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2025.05.016>