

≡ SERIE

AUTORES

Antonio Sánchez-Vallejo

Enfermero.
Coordinador de Trasplantes,
Medicina Intensiva,
Complejo Asistencial Universitario de
León, SACYL.
Profesor Asociado Dpto. de Enfermería
y Fisioterapia.
Facultad de Ciencias de la Salud,
Universidad de León.

CONTACTO

@ asanv@unileon.es

APROXIMACIÓN A LA VENTILACIÓN MECÁNICA.

Capítulo 3. Monitorización de la asistencia ventilatoria (y I).

Cualquier diagnóstico exige una monitorización previa del estado del paciente. Esta aporta una visión global de su estado y respuesta; aunque el mejor monitor posible continúa siendo el juicio profesional prudente. La evaluación de la asistencia ventilatoria abarca cuatro áreas fisiopatológicas: intercambio gaseoso, mecánica ventilatoria, actividad neurofisiológica respiratoria, y estado hemodinámico. Su monitorización puede ser intermitente, o continua, invasiva, o no invasiva.

Analizaremos únicamente la monitorización del intercambio gaseoso. Esta cuantifica variables de oxigenación, ventilación, y equilibrio ácido-base a través de tres técnicas: gasometría, pulsioximetría y capnografía. Su empleo cotidiano trasciende el ámbito del cuidado crítico, al igual que la propia ventilación mecánica.

La gasometría mide directamente sobre la muestra de sangre: presión parcial de oxígeno, saturación de oxígeno de la hemoglobina, presión parcial de CO₂, y pH. Datos calculados por el analizador gasométrico son los niveles de bicarbonato, exceso de bases, o la P50. Los modernos gasómetros permiten obtener datos como el lactato, iones de sodio, potasio, cloro, calcio, y glucemia; y datos relevantes en determinadas situaciones clínicas como carboxihemoglobina, hemoglobina fetal, y/o metahemoglobina. La gasometría arterial es el estándar en medición de gases en sangre, y referencia de calibración comparativa para otros sistemas no invasivos.

La medición no invasiva y continua de la saturación de oxígeno mediante pulsioximetría permite detectar precozmente la hipoxemia. Fácil de usar, no precisa calibración, bien tolerado por el paciente, exacto y rápido; el pulsioxímetro ha elevado la saturación de oxígeno al rango de quinta constante vital. Finalmente, la monitorización no invasiva del CO₂ mediante la determinación de la fracción de CO₂ al final de la espiración, o "End-Tidal CO₂", es conocida comúnmente como capnografía; de gran utilidad también en todos los ámbitos sanitarios. La monitorización del intercambio gaseoso ha trascendido al cuidado crítico para instalarse incluso en nuestros hogares.

PALABRAS CLAVE

análisis de gases arteriales, capnografía, monitorización, monitorización transcutánea, oximetría, respiración artificial.

ABSTRACT

Any diagnosis requires a prior monitoring of the patient's condition. This provides a global vision of its status and response; although the best possible monitor continues to be prudent professional judgment. The evaluation of ventilatory assistance covers four pathophysiological areas: gaseous exchange, ventilatory mechanics, respiratory neurophysiological activity, and hemodynamic state. Its monitoring can be intermittent, or continuous, invasive, or non-invasive.

We will analyze only the monitoring of gas exchange. This quantifies variables of oxygenation, ventilation, and acid-base balance through three techniques: gasometry, pulse oximetry and capnography. Its daily use goes beyond the critical care field, just like mechanical ventilation itself.

Gasometry measures directly on the blood sample: partial pressure of oxygen, oxygen saturation of hemoglobin, partial pressure of CO₂, and pH. Data calculated by the gasometric analyzer are the levels of bicarbonate, excess of bases, or the P50. Modern gasometers allow to obtain data such as lactate, sodium ions, potassium, chlorine, calcium, and glycemia; and relevant data in certain clinical situations such as carboxyhemoglobin, fetal hemoglobin, and / or methemoglobin. Arterial blood gas is the standard in blood gas measurement, and comparative calibration reference for other non-invasive systems.

The non-invasive and continuous measurement of oxygen saturation by pulse oximetry allows early detection of hypoxemia. Easy to use, does not require calibration, well tolerated by the patient, accurate and fast; The pulse oximeter has raised oxygen saturation to the fifth vital constant range. Finally, the non-invasive monitoring of CO₂ by determining the fraction of CO₂ at the end of the expiration, or "End-Tidal CO₂", is commonly known as capnography; very useful also in all health areas. The monitoring of gas exchange has transcended critical care to be installed even in our homes."

KEYWORDS

blood gas analysis, capnography, blood gas monitoring, transcutaneous monitoring, oximetry, artificial respiration.

En anteriores entregas de esta serie hemos podido conocer de forma básica a los dos actores fundamentales de la Ventilación Mecánica (VM): paciente y máquina; la fisiopatología respiratoria del primero, y los principios de funcionamiento de las segundas. El objetivo de este tercer capítulo de nuestra Aproximación a la Ventilación Mecánica es explicar las diversas variables que entran en juego a la hora de proveer asistencia respiratoria a un paciente. Estas variables constituyen los elementos de juicio necesarios para proveer asistencia ventilatoria, y respiratoria, adaptada a las necesidades de salud de quienes así lo precisan. La modificación de las mismas influirá sobre la condición fisiopatológica del paciente, de ahí la importancia de tomar la decisión correcta en cada caso.

Cualquier diagnóstico y posterior tratamiento no sería posible sin una monitorización previa del estado del paciente. Esta resulta crítica cuando hablamos del cuidado intensivo, formando la terapia respiratoria parte fundamental del mismo; pero no es menos importante dicha monitorización en áreas como las urgencias de Atención Primaria de Salud o los Servicios de Emergencias Médicas.

El conjunto de datos obtenido mediante la monitorización aporta una visión global del estado y la respuesta del paciente ante la VM administrada; sin embargo no debemos olvidar que el mejor monitor posible es el juicio prudente del profesional que recopila toda la información posible sobre el paciente antes de proponer una terapia. La evaluación continuada del estado fisiopatológico del paciente permite la toma objetiva de decisiones respecto de la asistencia ventilatoria prestada; además de evaluar la respuesta obtenida con la misma.

La sistemática de evaluación de la asistencia ventilatoria debe abarcar siempre cuatro áreas críticas de la fisiopatología del paciente tratado con VM, el cual no tiene necesariamente que padecer patología respiratoria. Dichas áreas son el intercambio gaseoso, la mecánica ventilatoria, la actividad neurofisiológica respiratoria y el estado hemodinámico del paciente. Estas pueden monitorizarse de forma in-

termitente o continuada, mediante métodos y metodologías invasivas y no invasivas. En la presente entrega analizaremos exclusivamente la monitorización del intercambio gaseoso.

Una adecuada evaluación del intercambio gaseoso exige cuantificar variables relativas a la oxigenación, la ventilación, y el equilibrio ácido-base. Para ello disponemos de tres técnicas principales: la gasometría, la pulsioximetría y la capnografía. El empleo de las tres resulta ya cotidiano, trascendiendo el ámbito del cuidado crítico del mismo modo que lo ha hecho la propia VM.

LA GASOMETRÍA.

Obtenida mediante punción y/o cateterización de un vaso, la gasometría puede realizarse sobre sangre arterial, venosa, o mixta de capilar, u obtenida del circuito capilar pulmonar mediante catéter de arteria pulmonar, o de Swan Ganz.

Uno de los datos básicos obtenidos mediante gasometría es la Presión parcial de oxígeno (PO_2) en sangre. Corresponde ésta a la presión, o concentración, de oxígeno disuelto en plasma sin unirse a la hemoglobina. También la saturación de oxígeno de la hemoglobina (SO_2), que nos indica qué proporción del oxígeno disponible en la muestra va ligado a dicha molécula. Obtendremos también la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) libre en plasma, o Presión parcial de CO_2 (PCO_2). El pH es la tercera medición directa sobre la muestra de sangre, y refleja la concentración de cationes de hidrógeno (H^+) libres en plasma.

Otros datos aportados son producto de complejos cálculos, realizados por el analizador gasométrico, a partir de las mediciones reales. Tal es el caso de los niveles de bicarbonato (H_2CO_3), el exceso de bases calculado (sBE), o la P50. Esta última variable hace referencia a la presión parcial de oxígeno necesaria para que la hemoglobina en sangre esté saturada al 50%. Es un indicador de afinidad de la hemoglobina por el oxígeno que transporta; en condiciones estándar (37 °C, pH 7,4 y $PaCO_2$ 40 mmHg) su valor normal es 25-27 mmHg en sangre arterial.

Este dato, particularmente útil, nos informa sobre la cesión de oxígeno a los tejidos desde la oxihemoglobina (O_2Hb). Su valor varía en el mismo sentido que la desviación de la curva de disociación de la hemoglobina, y en determinadas circunstancias con este valor se pueden diagnosticar enfermedades como la metahemoglobinemia.

Los modernos analizadores gasométricos, de los que la **figura 1** es un ejemplo, permiten además obtener otros datos de gran interés como el lactato, iones de sodio, potasio, cloro y calcio iónico (Na^+ , K^+ , Cl^- y Ca^{+2}), o la glucemia. Otros datos aportados por la gasometría, muy útiles a la hora de interpretar los valores de oximetría en determinadas situaciones clínicas, son: el valor de Carboxihemoglobina (COHb), o hemoglobina ligada a monóxido de carbono (CO), el porcentaje de hemoglobina fetal (FetHb), o la tasa de Metahemoglobina (MetHb) entre otros.

La gasometría arterial continúa siendo el estándar en medición de gases en sangre, sirviendo como referencia de calibración comparativa de medida para otros sistemas de monitoreo ventilatorio no invasivos. A lo largo de este artículo iremos desglosando sus parámetros de normalidad cuando hablemos de la medición de cada gas en concreto.

La gasometría arterial tiene dos "hermanas" pequeñas: la gasometría venosa y la gasometría mixta, que complementan determinados datos de la arterial para algunos cálculos. Sus valores son ligeramente diferentes. El pH suele ser 0,03-0,15 puntos inferior a los de la arterial, la PO_2 venosa (PvO_2); suele situarse en torno a 40 mmHg, menos del 50%



Figura 1.
Gasómetro Radiometer© ABL 90 FLEX PLUS.
Obtenido de www.radiometer.es

LA GASOMETRÍA APORTA DATOS MUY PRECISOS; SIN EMBARGO, NO RESULTA ADECUADO, EN GENERAL, TOMAR DECISIONES TRASCENDENTES ANTE UN DATO PUNTUAL DE LABORATORIO

de los valores arteriales normales para este parámetro; y, por el contrario, la PCO_2 venosa (PvCO_2) es 5-7 mmHg superior a la arterial (PaCO_2). El valor del H_2CO_3 venoso solamente excede en 1 a 3 mmol/L su valor estándar en sangre arterial.

La gasometría aporta datos muy precisos; sin embargo, no resulta adecuado, en general, tomar decisiones trascendentes ante un dato puntual de laboratorio; siendo recomendable tener también en cuenta los datos de tendencia. Precisamos, por tanto, una seriación de datos que nos informe sobre la evolución y efectividad de cualquier cambio realizado en la terapia ventilatoria. Los métodos incruentos disponibles como la pulsioximetría y la capnografía, que trataremos más adelante, aunque más expuestos a sesgos o inexactitudes, aportan esos datos de tendencia tan necesarios para la toma de decisiones tras un análisis puntual.

La gasometría, especialmente la arterial y la capilar pulmonar, supone un procedimiento invasivo. Los datos son obtenidos tras la punción y/o canalización de un vaso. Estas técnicas no están exentas de complicaciones como hematomas, flebitis, o infecciones en el caso de punciones y catéteres venosos. Aneurismas y pseudoaneurismas de la íntima arterial también pueden darse tras puncionar o cateterizar vasos arteriales. Los embolismos e isquemias pulmonares son complicaciones severas de los catéteres de arteria pulmonar. Y tampoco debemos obviar la posibilidad de un hematoma secundario a punción arterial que podría comprimir el nervio adyacente al vaso; debiendo, por tanto, realizar una cuidadosa hemostasia tras la extracción de la muestra. Más frecuente resulta el espasmo del vaso arterial puncionado, por lo que también debe vigilarse el correcto relleno capilar de la zona irrigada por dicho vaso.

Por otra parte, debemos señalar igualmente que la obtención de muestras mixtas, tanto capilares como de catéter de arteria pulmonar, requiere de un entrenamiento por parte del personal que garantice la obtención de una muestra válida.

A continuación se procede a describir las variables relacionadas con el intercambio gaseoso que deben ser monitorizadas durante la aplicación de asistencia ventilatoria.

MONITORIZACIÓN OXIMÉTRICA

Entre los parámetros útiles para la monitorización de la oxigenación, la presión parcial de oxígeno (PO_2) en sangre, y la saturación de oxígeno de la hemoglobina (SO_2) son los más empleados. La primera puede ser determinada en sangre arterial (PaO_2), venosa (PvO_2), o mixta. La más habitualmente empleada es la PaO_2 , cuyo rango de normalidad en el adulto se sitúa entre 80 y 100 mmHg. Valores de PaO_2 por debajo de 80 mmHg se definen como hipoxemia, y una $\text{PaO}_2 < 60$ mmHg define la hipoxia, que debe ser tratada de inmediato. No obstante, la PaO_2 no debe tomarse como valor aislado, sino que debe interpretarse siempre en relación a la fracción inspirada de oxígeno (FiO_2). En base a este indicador se comprende que la relevancia de una PaO_2 de 95 mmHg res-

pirando un 100% de oxígeno ($\text{FiO}_2=1$) es completamente diferente al mismo valor de PaO_2 respirando aire ambiental ($\text{FiO}_2=0,21$).

El cálculo de la relación $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ (conocido como "PaFi") es el índice de oxigenación más utilizado y fácil de obtener. El índice $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ normal en el adulto, respirando aire ambiente ($\text{O}_2 \sim 21\%$), oscila entre 380 y 475 (80/0,21 a 100/0,21). Este índice permite, por ejemplo, diferenciar la lesión pulmonar aguda ($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2 < 300$) del síndrome de distrés respiratorio agudo ($\text{PaO}_2/\text{FiO}_2 < 200$); entidades fisiopatológicas ambas muy severas cuya distinción es de importancia vital, ya que su afrontamiento terapéutico difiere notablemente en cuanto a la aplicación de VM.

De igual modo el índice $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ desciende ante desequilibrios de la ventilación-perfusión pulmonar (V/Q), como los que acontecen en el tromboembolismo pulmonar. También desciende en situaciones de hipoventilación de origen respiratorio, neurológico, o metabólico; o situaciones de hipoxia crónica de origen respiratorio o cardiaco. La altitud del terreno también condiciona disminución del índice $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$ según ganamos altura; su máxima expresión es el denominado "mal de altura" de los escaladores. En todas estas situaciones es precisa la asistencia respiratoria y su monitorización.

La segunda variable a considerar a la hora de monitorizar la oxigenación durante la asistencia ventilatoria es la saturación de oxígeno de la hemoglobina (SO_2). Se halla íntimamente relacionada con la PO_2 , y al igual que esta, puede medirse en sangre arterial (SaO_2), venosa (SvO_2) y/o mixta. También puede medirse mediante pulsioximetría (SpO_2), como seguidamente veremos. El valor normal de SaO_2 está en torno a 97%. Esto significa que el 97% de toda la Hb está saturada de oxígeno. En este escenario la PaO_2 suele estar próxima a 100 mmHg.

La relación entre PaO_2 y SaO_2 está representada por la curva de disociación de la oxihemoglobina (O_2Hb) (figura 2). Con forma sigmoidea, esta curva posee gran relevancia a la hora de decidir la FiO_2 que le pondremos al paciente y otras me-

didadas, además de ulteriores modificaciones. Y es que, según puede apreciarse en la **figura 2**, por debajo del 90% de SaO_2 leves descensos de la PaO_2 correlacionan con grandes caídas de la SaO_2 , mientras que con $SaO_2 > 95\%$, grandes incrementos de PaO_2 , a expensas de incrementos significativos de la FiO_2 , solamente inducen una mínima mejora de la SaO_2 .

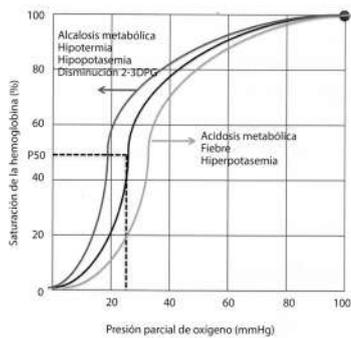


Figura 2.
Curva de disociación de la hemoglobina y afectación de la afinidad por diferentes variables.
Tomado de: Rodríguez A et al. Ventilación mecánica. Fisiopatología respiratoria aplicada. p.69.

Esto tiene interés desde el punto de vista de la valoración de los datos obtenidos mediante pulsioximetría, por la correlación positiva existente entre esta y la SaO_2 . Tal es así que, habitualmente los cambios en la FiO_2 se fundamentan en los datos pulsioximétricos obtenidos entre gasometrías seriadas. A modo de orientación, y en condiciones estándar, valores de $SaO_2 > 97\%$ correlacionan con $PaO_2 > 90$ mmHg. SaO_2 entre 90% y 95% aproximan PaO_2 entre 60 y 80 mmHg respectivamente; y cuando la SaO_2 se acerca a 80%, estamos ante PaO_2 en el entorno de los 50 mmHg.

A nivel práctico, lo expuesto revela lo innecesario de incrementar la FiO_2 cuando la SaO_2 de un paciente oscila entre 95% y 97%; ni tampoco poner el objetivo terapéutico en la consecución de SaO_2 de 100%. Comprobamos también la importancia de ponderar debidamente la necesidad de aplicar FiO_2 superiores a 0,5 de forma prolongada. Debemos

recalcar que una vez alcanzada la $SaO_2 > 95\%$ son necesarios grandes incrementos de la PaO_2 mediante FiO_2 elevadas para lograr pequeños aumentos de la SaO_2 . También hay que recordar los efectos tóxicos del oxígeno a concentraciones superiores a 45%-50% comentados en capítulos anteriores. En próximas entregas, cuando se trate la monitorización de la mecánica ventilatoria, descubriremos una variable, la PEEP (Positive End-expiration Pressure), con cierta utilidad para la oxigenación.

No obstante a lo expuesto, en absoluto debemos tomar la SaO_2 como predictor exacto el valor de PaO_2 . La afinidad de la hemoglobina por el oxígeno es muy sensible a las modificaciones del medio en que se encuentra esta molécula. La curva de disociación puede desplazarse a la derecha en presencia de hipertermia, hipercapnia y/o acidosis, lo que reduce la afinidad de la Hb por el oxígeno, cediendo este a los tejidos con mayor facilidad. En ocasiones esto es un hecho fisiológico, como la acidosis láctica durante la práctica deportiva intensa. Lo contrario ocurre si la curva se desvía a la izquierda. La afinidad por el oxígeno aumenta, dándose menor cesión tisular de oxígeno en situaciones de alcalosis, hipocapnia y/o hipotermia.

Se deduce de lo expuesto lo imprescindible de las gasometrías seriadas en la adecuada monitorización de la terapia respiratoria. Sin embargo, entre gasometrías, la SaO_2 también puede medirse de forma no invasiva y continua a la cabecera del paciente mediante pulsioximetría (SpO_2).

La monitorización continuada de la SpO_2 mediante pulsioximetría se ha generalizado en las últimas décadas en Atención Primaria de Salud y en la emergencia extrahospitalaria, donde ha demostrado ser una herramienta fundamental. Actualmente colocar un pulsioxímetro resulta más común incluso que la monitorización electrocardiográfica continua. Incluso hay modelos, orientados a la práctica deportiva y el cuidado domiciliario en salud, que pueden enlazarse con nuestros smartphones a través de las aplicaciones de salud disponibles.

Su facilidad de uso, pues no requiere

calibración, la buena tolerancia por parte del paciente, unido a la exactitud y rapidez en la medición han sido factores clave para que haya alcanzado el estatus de quinta constante vital junto a la frecuencia cardiaca, la tensión arterial, la frecuencia respiratoria y la temperatura. Su uso adecuado reduce además significativamente el número de gasometrías, disminuyendo costes económicos, pero sobre todo, molestias y complicaciones para el paciente.

El objetivo de monitorizar la SpO_2 va más allá de evitarle molestias al paciente. La verdadera razón de ser de la pulsioximetría es el diagnóstico precoz de episodios de hipoxemia difícilmente detectables por la clínica. Es preciso tener en cuenta que el principal signo de hipoxemia, la cianosis, no suele aparecer hasta que se dan niveles graves de hipoxia, con SaO_2 inferiores al 80%. Precisamente aquí es donde radica su éxito y su utilidad.

Permite prevenir y detectar precozmente la hipoxemia en pacientes críticos, además de cuantificar su respuesta a las modificaciones de los parámetros de oxigenoterapia y/o VM. Es muy útil durante la anestesia y la recuperación de la misma, y en el control oximétrico del paciente durante la realización de técnicas diagnósticas o terapéuticas que precisen sedación. Se ha empleado incluso para el control de la oxigenación fetal durante el parto.

El pulsioxímetro consta de un sensor que se adapta al lecho vascular pulsátil del dedo, al lóbulo de la oreja, sobre la nariz, o sobre alguna zona de la piel; generalmente de la frente, o del pie en el caso de los neonatos. Este sensor se conecta a una unidad de procesamiento fija o portátil, que muestra en pantalla el valor numérico de SpO_2 , y la frecuencia y onda de pulso, o pletismografía. Las dos últimas coinciden con la frecuencia cardiaca y la onda de pulso de presión arterial respectivamente.

Hay dos métodos de medición de la SpO_2 : la reflectancia luminica y, el más empleado, de transmisión de luz. En cualquier caso el pulsioxímetro posee un fotodetector para la luz emitida por dos diodos con diferente longitud de onda: roja de 660 nanómetros para detectar hemoglobina reducida (sin O_2 , pero cargada

de CO₂ o de CO), e infrarroja de 940 nanómetros para medir la oxihemoglobina. El pulsioxímetro mide la transmisión y recepción de luz valiéndose de la espectrofotometría y la fotopleletismografía. La primera mide el porcentaje de saturación de la O₂Hb; y la fotopleletismografía cuantifica la diferencia entre oxihemoglobina y hemoglobina reducida.

El análisis de la fluctuación de cada tipo de frecuencia permite ofrecer la onda pletismográfica de pulso. La **figura 3** muestra el trazado pletismográfico típico en condiciones normales (onda afilada con cisura dicota marcada), y los trazados en situaciones de hipoperfusión tisular, o de artefactos de medición. Estos dos últimos escenarios invalidan la medición de SpO₂.

El margen de error promedio asumido en la medición de SpO₂, para SaO₂>80%, es de ±4-5% respecto a la SaO₂ real medida con cooximetría o gasometría. Por debajo de esta cifra la medición de SpO₂ resulta altamente inexacta en su correlación con la SaO₂. Para asegurar una SaO₂ próxima a 95% es recomendable mantener SpO₂ superiores a 92% (95% para los individuos de raza negra).

En cuanto a la ubicación del sensor, la evidencia informa de mejores resultados de medición con el sensor situado en el lóbulo de la oreja;

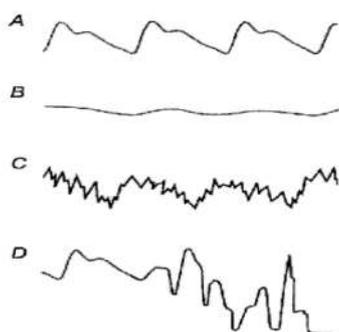


Figura 3.
Ondas de pulso más comunes en un pulsioxímetro de pulso.
A. Onda normal. B. Onda de baja perfusión tisular. C. Artefacto electromagnético. D. Artefacto por movimientos del paciente.
Tomado de: Jubran A. Pulse oximetry. Intensive Care Med. 2004; 30:p.2017

registrándose menor variabilidad por artefacto de medición o baja perfusión tisular. Sin embargo, existen diversos factores que alteran la exactitud de la pulsioximetría. La luz ambiental intensa es uno de ellos, pero también los artefactos electrónicos o por movimientos del paciente.

La hiperpigmentación de la piel, especialmente en los individuos de raza negra, dificulta la medición; ofreciendo valores falsamente elevados. No ocurre lo mismo con la hiperbilirrubinemia. Tampoco hay evidencia de que la anemia sea un hándicap para la correcta medición de la SpO₂, encontrando mediciones adecuadas incluso con Hb<5,5 g/dl.

Por el contrario, las entidades clínicas que cursan con hipoxemia y/o hipoperfusión crónicas ofrecen valores erróneamente bajos a la medición en el lecho ungueal. Igualmente ocurre en presencia de lacas de uñas, especialmente las de color azul, verde, o negro; o de colorantes intravenosos como el azul de metileno, empleado en el tratamiento de la metahemoglobinemia. En estas circunstancias el bloqueo del espectro de luz del pulsioxímetro ofrece medidas de SpO₂ erróneamente bajas.

Pero con diferencia, las dishemoglobinemias constituyen uno de los más peligrosos factores que alteran la exactitud de la pulsioximetría. Su desconocimiento puede llevarnos a validar datos que enmascaran situaciones con un importantísimo compromiso respiratorio. Y es que los pulsioxímetros son incapaces de diferenciar la oxihemoglobina de la carboxihemoglobina (COHb), o de la metahemoglobina (MetHb).

La COHb absorbe la luz infrarroja de 940nm con la misma intensidad que la oxihemoglobina. Esto aporta valores de SpO₂ falsamente elevados en presencia de COHb, al aparentar ser esta oxihemoglobina normal. Esto es propio de las intoxicaciones por monóxido de carbono (CO). De modo similar la MetHb absorbe la luz roja de 660nm tal y como lo hace la hemoglobina reducida (CO₂Hb). En este escenario los valores de SpO₂ son próximos a 85%, aparentando una situación de hipoxia. Tal es el caso de las intoxicaciones por metanoles o por anticongelantes en

las que el tratamiento con FiO₂ muy elevadas es completamente fútil. Ambas situaciones comportan gran riesgo vital para el paciente; y la pulsioximetría no debe engañarnos llevándonos a incrementar la FiO₂ como único medio de tratamiento.

MONITORIZACIÓN CAPNOMÉTRICA.

Continuando con la monitorización del intercambio gaseoso, veamos ahora cómo monitorizamos la ventilación; o lo que es lo mismo: el intercambio de CO₂. Para ello emplearemos también dos parámetros de referencia: la presión parcial de dióxido de carbono en sangre (PCO₂), y la monitorización no invasiva de la fracción de CO₂ al final de la expiración, o "End-Tidal CO₂" (ETCO₂), conocida comúnmente como capnografía.

Al igual que la PO₂, la PCO₂ puede determinarse en sangre arterial (PaCO₂), venosa (PvCO₂), o mixta. La variable más empleada es la PaCO₂, cuyo valor estándar para el adulto oscila entre 35 y 45 mmHg. La PaCO₂ refleja el balance entre la producción de CO₂ (VCO₂) a través de las vías metabólicas, y su eliminación pulmonar o ventilación alveolar (VA): PaCO₂ = VCO₂/VA. Por tanto, la PaCO₂ está condicionada por factores respiratorios y metabólicos, siendo la vía respiratoria la primera línea fisiológica de compensación. Del mismo modo, la asistencia ventilatoria constituye la primera línea terapéutica para regular la PaCO₂. El incremento del volumen circulante disminuirá la PaCO₂, y viceversa; sin embargo, su uso indiscriminado también propicia una sobredistensión alveolar que puede ocasionar daños pulmonares severos. Recuerde el lector el primer capítulo de esta serie.

Tradicionalmente se hiperventilaba a los pacientes con patología respiratoria con el objetivo de normalizar su PaCO₂ elevada; bien incrementando la frecuencia respiratoria, bien el volumen minuto ventilatorio, o ambos. Pero todo tiene sus límites. La evidencia ha demostrado que no debemos obstinarnos en el intento de normalización de la PaCO₂ de estos pacientes. Resulta más efectivo mantener la PaCO₂ controladamente elevada (hipercapnia permisiva), empleando volúmenes minuto menores que eviten la sobredistensión

alveolar, y las potenciales lesiones iatrogénicas que ocasiona la hiperventilación a volúmenes elevados. Por otra parte, el incremento excesivo de la frecuencia respiratoria implica disminución del tiempo espiratorio, lo que ocasiona atrapamiento aéreo y sobredistensión alveolar también. Es el fenómeno denominado auto-PEEP que veremos en capítulos posteriores.

Otro aspecto que debemos cuidar, en relación al control ventilatorio, es la restricción al mínimo del volumen de espacio muerto ventilatorio. Tubuladuras demasiado largas, o la adición de dispositivos intercalados en ellas (nebulizadores, trampas de agua, etc.) incrementan notablemente este volumen, constituyendo un factor decisivo en el incremento de la PaCO_2 vía reinhalación de aire expirado.

Debemos, por tanto, tener siempre muy presente en el cuidado del paciente tratado con VM que, pequeños incrementos del volumen de espacio muerto propician sobredistensión alveolar; al imponer la necesidad de aumentar el volumen minuto ventilatorio para mantener la tasa de PaCO_2 . Los modernos ventiladores suelen compensar estos extremos, pero tienen un límite impuesto por la frecuencia respiratoria pautada, y el tiempo espiratorio disponible; que a su vez depende de la pauta clínica y de la condición fisiopatológica del paciente.

De lo expuesto se deduce la necesidad de un control exhaustivo de la



Figura 4.
Sensor y módulo CO_2 de capnografía para sistema de monitorización Philips MI460a.
Imagen propia UCI CAULE.

PCO_2 en determinadas situaciones clínicas. Para ello es fundamental una exquisita regulación del volumen minuto ventilatorio.

A mediados del S. XX comenzó el desarrollo de la tecnología que actualmente nos permite ese control: el capnógrafo. Este instrumento posibilita la medición, no invasiva y continuada, de la concentración de CO_2 en el aire expirado.

Este dato nos permite tomar decisiones en tiempo real respecto al volumen minuto ventilatorio administrado. Además minimiza la necesidad de gasometrías a las mínimas, para conocer la diferencia entre la medición capnográfica y la PaCO_2 real. La figura 4 muestra un capnógrafo de flujo central, los más habitualmente empleados.

Los términos "capnografía" y "capnometría" son conceptos distintos. La capnografía es la representación gráfica del CO_2 exhalado, mediante un trazado continuo denominado "capnograma". El capnograma representa, en función del tiempo, la concentración fraccional, o presión parcial de CO_2 , presente en la mezcla del aire expirado. El análisis de la curva de capnograma también nos aporta información útil para reconocer la situación clínica ante la que podemos encontramos.

Toda representación capnográfica se caracteriza por poseer cuatro fases, como puede apreciarse también en la figura 5. La fase I indica el comienzo de la espiración. El gas exhalado es similar al aire inspirado; apenas contiene CO_2 al proceder de las vías aéreas de conducción, y no participar del intercambio gaseoso. Esta fase mide el CO_2 presente en el volumen de espacio muerto anatómico.

La fase II refleja los primeros instantes de la salida del gas alveolar al exterior. Este se mezcla con la parte final del volumen de espacio muerto ventilatorio. La mezcla se enriquece con rapidez del CO_2 expirado, y aparece una elevación aguda de la curva del capnograma. A modo de ejemplo ilustrativo señalaremos que en las patologías respiratorias de tipo obstructivo, donde la salida del aire se ve dificultada, esta fase es menos abrupta; pues la mezcla de esos gases se da con más lentitud;

de igual modo ocurre en presencia de broncoespasmo, donde la silueta de aleta de tiburón en el capnograma es característica.

La fase III acontece mientras dura la exhalación del total de gas alveolar; esto es, del volumen tidal espiratorio. La curva capnográfica se nivela, formando una meseta con pendiente muy ligeramente ascendente en condiciones normales, y con un leve repunte final. Ello es debido a que a medida que se exhala el volumen tidal la mezcla espiratoria va siendo progresivamente más rica en CO_2 ; siendo máxima la concentración de este gas al final de la espiración, justo antes del comienzo de la inspiración.

Es en este punto donde se mide el ETCO_2 , cuya expresión numérica se manifiesta en el valor de capnometría. El número indicado en pantalla se expresa en mmHg; y presenta mayor o menor correlación con la PaCO_2 , como ya se ha explicado. Finalmente, la fase IV ocurre durante la inspiración. La concentración de CO_2 cae de nuevo prácticamente a cero, por lo que en el capnograma se registra una abrupta pendiente descendente hasta la situación inicial.

Por su parte, la capnometría puede ser cualitativa, basada en la quimioluminiscencia de tiras reactivas colorimétricas al contacto con el CO_2 exhalado; o cuantitativa. Este último es el método de medición más extendido. Proporciona más información, más rápido, y con mayor objetividad. Además de cuantificar

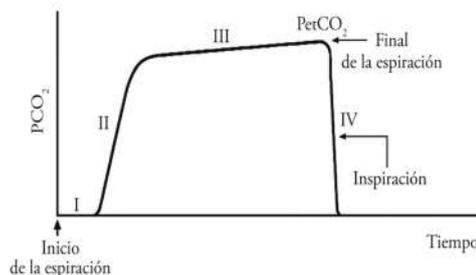


Figura 5.
Curva normal de capnografía y fases de medición.
Tomado de: Ramos Gómez I.A y Benito Vales S. Fundamentos de la Ventilación Mecánica. Libro electrónico disponible en: <http://www.fundamentosventilacion-mecanica.com/C10.html>

numéricamente el ETCO_2 aporta datos útiles sobre otras variables en pocos segundos.

La medición del ETCO_2 se realiza mediante espectroscopia de absorción (el CO_2 absorbe la luz infrarroja a 426 nanómetros); cuantificando la cantidad de infrarrojo absorbida por una muestra de gas exhalado. A partir de esta medida se calcula la presión parcial de CO_2 en esa mezcla de aire espirado. La capnometría toma como referencia el valor de CO_2 al final de la espiración por ser el momento del ciclo respiratorio en el cual la cifra de este gas es más alta en el aire espirado, de ahí la denominación "End-Tidal CO_2 ". Su valor normal oscila entre 30 y 40 mmHg, y en ausencia de patología respiratoria difiere entre 1 y 3 mmHg del valor de la PaCO_2 .

Esta diferencia resultará amplificada por los fenómenos ya explicados de espacio muerto, o bien de shunt pulmonar, propios de determinadas patologías respiratorias. También la hipertermia, la hipotermia, la hipo/hiperventilación alveolar, el incremento o disminución del gasto cardiaco, el colapso pulmonar, o la intubación selectiva de uno de los pulmones pueden hacer variar la relación PaCO_2 - ETCO_2 .

Se desprende de ello la necesidad de calibrar esa diferencia mediante gasometrías periódicas en presencia de estas u otras alteraciones fisiopatológicas. Esto habitualmente se hace una vez por turno, coincidiendo con la extracción gasométrica habitual y protocolaria en las UCI. No obstante, su utilidad en uso ambulatorio en emergencias extrahospitalarias, o en el propio servicio de urgencias no se ve empañada por esta cuestión. Junto al pulsioxímetro, y a los modernos ventiladores de transporte, el capnógrafo conforma el mejor sistema de monitorización de la asistencia ventilatoria fuera del ámbito del cuidado crítico.

Los modernos analizadores de CO_2 reflejan adicionalmente en pantalla la mínima concentración de CO_2 en aire inspirado, o MiCO_2 . El aire medicinal inspirado apenas posee CO_2 ; su valor nominal está próximo al 0,3%, y permite ajustar los cálculos de ETCO_2 . La **Figura 6** muestra un monitor de UCI con la monitorización capnográfica habitual, que

incluye capnograma y valor de capnometría entre otros parámetros.



Figura 6. Monitor de cabecera UCI con capnograma y capnometría.

La evidencia demuestra la utilidad y vigencia de la capnografía a la hora de evaluar la eficiencia de la VM, además de como predictor de la PaCO_2 en condiciones respiratorias estándar, una vez conocida la diferencia PaCO_2 - ETCO_2 . No obstante, y como ya se ha dicho, no puede tomarse esta medición de forma aislada para evaluar la situación ventilatoria del paciente, ni la propia VM, sin poner los datos obtenidos en relación con el resto de parámetros del paciente y su situación clínica.

La medición capnográfica puede verse alterada por las circunstancias fisiopatológicas antes mencionadas, además de por otras adicionales derivadas del funcionamiento del respirador, de los dispositivos de asistencia ventilatoria instalados, y del propio cuidado del paciente. Así, por ejemplo, una tubuladura acodada o que fuga, un neumotaponamiento deficientemente inflado, la presencia de secreciones bronquiales, etc. deben ser siempre tenidos en cuenta, aplicando los cuidados necesarios para que su impacto sobre la medición sea mínimo.

MONITORIZACIÓN ACIDO-BASE.

La última variable gasométrica medible directamente en una muestra de sangre es el pH, bien sea arterial, venoso o mixto. Sin unidades que expresen su magnitud, su valor resulta del cálculo del logaritmo negativo de la concentración en sangre del catión hidrógeno (H^+): $\text{pH} = -\log\text{H}^+$. Su rango estándar de referencia en sangre arterial para el adulto oscila entre 7,35 y 7,45.

Representa, por tanto, el inverso de la presión parcial de protones de hidrógeno (H^+) en sangre, cuantificada en mmol/L. A mayor concentración de estos el pH será menor, o más ácido; nominándose esa situación como "acidosis" con $\text{pH} < 7,35$. No vamos a entrar a valorar los diferentes tipos de acidosis o alcalosis, ni su origen. La **figura 7** muestra un ejemplo del normograma de equilibrio ácido básico de Siggaard-Andersen que nos ofrecen los modernos analizadores gasométricos para orientar el diagnóstico a cerca de esta cuestión.

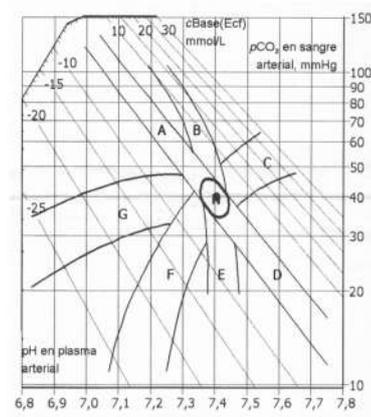


Figura 7. Normograma Siggaard-Anderson para interpretación de gasometrías.

- A. Acidosis respiratoria aguda.
- B. Acidosis respiratoria crónica.
- C. Alcalosis metabólica crónica.
- D. Alcalosis respiratoria aguda.
- E. Alcalosis respiratoria crónica.
- F. Acidosis metabólica crónica.
- G. Acidosis metabólica aguda.
- N. Área normal

Radiometer Medical Aps. Tomado de gasómetro UCI CAULE.

Los "hidrogeniones" que dan magnitud al pH proceden de diversas vías metabólicas. La principal de ellas es la disociación del bicarbonato según la ecuación de Henderson-Hasselbach: $\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = (\text{H}^+ + \text{OH}^-) + \text{CO}_2$. El CO_2 resultante de los procesos metabólicos se elimina principalmente por vía pulmonar, a través de la ventilación. Por tanto, poco importa si la acidosis es metabólica o respiratoria, su primera línea de tratamiento será siempre la ventilación.

Incrementar la ventilación alveolar, vía mayor volumen tidal o frecuencia respiratoria, eliminará CO_2 , lo que redundará en valores superiores de pH. Recordemos, no obstante, las limitaciones y riesgos ya mencionados de estas maniobras. Igualmente debemos ser cautos a la hora de tratar la acidosis con HCO_3^- . La ecuación de Henderson-Hasselbach antes descrita muestra que la adición de bicarbonato de forma indebida ocasionará mayor incremento del CO_2 . El empleo de este recurso queda limitado a situaciones de acidosis severa, con $\text{pH} < 7,20$, de origen claramente metabólico y repercusión sobre la hemodinámica del paciente.

Para finalizar debemos añadir un dato de gran interés que deliberadamente hemos dejado para el final del artículo. La medición en sangre de la

PO_2 , PCO_2 y pH se ven afectadas por los cambios en la temperatura corporal del paciente, y por la presión barométrica del lugar de realización de la gasometría.

La altitud del lugar condiciona la presión barométrica, y por tanto la presión de difusión de los gases respiratorios a uno y otro lado de la membrana alveolo-capilar. Habitualmente este dato se integra en los parámetros de calibración de los analizadores, no siendo preciso insertarlo en los datos de cada muestra procesada; pero es necesario tener en cuenta que su valor no es igual en la meseta que a nivel del mar.

La temperatura será el otro factor de corrección que, debido a su variabilidad, es preciso insertar en cada

una de las muestras. Recordemos que ésta, entre otros factores, desplaza hacia derecha o izquierda la curva de disociación de la oxihemoglobina; por lo que no tener en cuenta este dato puede aportar valores inexactos de oxigenación.

Por su parte, el uso rutinario de capnografía y oximetría de pulso reducen ampliamente la necesidad de análisis sanguíneos, frecuentes ya de por sí en las unidades de cuidados intensivos. Esto redundará en menos molestias y morbilidad iatrogénica para el paciente; siempre y cuando conozcamos bien los dispositivos de monitorización que empleamos y sus limitaciones; y sepamos interpretar la valiosa información que proporcionan. A ello ha ido destinado el presente trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Company Teuler RJ, Belda Nacher FJ, Llorens Herreras J y Martí Canovés F. Monitorización del respirador. En: de Borja de la Quintana Gordón F, Chamorro C, Planas A, López E. Monitorización en anestesia, cuidados críticos y medicina de urgencias. Madrid: Elsevier, 2004. p.296-322.
- Ibañez Juvé J, Velasco Roca J y Raurich Puigdevall JM. Pulsioximetría. En: de Borja de la Quintana Gordón F, Chamorro C, Planas A, López E. Monitorización en anestesia, cuidados críticos y medicina de urgencias. Madrid: Elsevier, 2004. p.245-53.
- Ichai C, Massa H et Hubert S. Troubles de l'équilibre acidobasique chez l'adulte. EMC. Anesthésie-Reanimation. Elsevier Masson SAS. Paris, 2006. 36-860-A-50.
- Jubran A. Pulse oximetry. Intensive Care Med. 2004; 30:2017-20. DOI 10.1007/s00134-004-2399-x
- Lemaire F, Bak E, Benito S. Monitorización respiratoria durante la ventilación mecánica. En: Net A, Benito S, editores. Ventilación mecánica. Barcelona: Springer-Verlag Ibérica, 1998. p. 281-92.
- Lock R, Francke K y Nötzli B. Manual de extracción de muestras de sangre. Bronshoj: Radiometer Medical A/S; 2000. 73p.
- López Serrano D. Diseño e implementación de un pulsioxímetro. Trabajo Fin de Grado Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Tutores: Pérez Fuster C y Montilla Meoro F. Universitat Politècnica de València. Defensa 01/09/2017. Disponible: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/91753/L%20C3%93PEZ%20-%20Dise%C3%B1o%20e%20implementaci%C3%B3n%20de%20un%20pulsiox%C3%ADmetro.pdf?sequence=1>
- Martínez López P, Hernández Rodríguez JV y Vallejo Báez A. Monitorización respiratoria. En: Aragonés Manzanares R y Rojas Román JP. Cuidados Intensivos: Atención Integral al Paciente Crítico. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2016. p. 29-38.
- Montejo JC, García de Lorenzo A, Marco P y Ortiz C. Manual de Medicina Intensiva. 5ª ed. Madrid: Elsevier; 2016. 599p.
- Mosquera González JM. Monitorización del estado ácido-base. En: de Borja de la Quintana Gordón F, Chamorro C, Planas A, López E. Monitorización en anestesia, cuidados críticos y medicina de urgencias. Madrid: Elsevier, 2004. p.275-95.
- Pardo Vázquez JP y Matuz Mares D. El uso de la ecuación de Henderson-Hasselbalch para el cálculo del pH en sangre. Rev. educ. bioquim. 2014; 33(2): 48-50. Disponible: <http://www.scielo.org.mx/pdf/reb/v33n2/v33n2a3.pdf>
- Pérez G. [Internet] n.d. Gasometría.com. [Consultado 01/11/2018]. Disponible en: <https://www.gasometria.com/>
- Planas Roca A y Hernández Salvan J. Capnografía. En: de Borja de la Quintana Gordón F, Chamorro C, Planas A, López E. Monitorización en anestesia, cuidados críticos y medicina de urgencias. Madrid: Elsevier, 2004. p.254-63.
- Radiometer Medical A/S. Manual de gases en sangre. Bronshoj: Radiometer Medical A/S; 1998. 105p.
- Ramos Gómez LA y Benito Vales S. Fundamentos de la Ventilación Mecánica. Barcelona: Marge Médica Books; 2012. 254p. Versión electrónica: <http://www.fundamentosventilacionmecanica.com/index.html> [Consultado 01/11/2018].
- Reyes-Palomino AM, Márquez-González H, Mireya Muñoz-Ramírez C, Toledo-Gómez L, Zárate-Castañón P y Almeida-Gutiérrez E. Aplicación y utilidad de las reglas de oro del bicarbonato. El Residente. 2015; 10 (2): 83-7. Disponible: <http://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=60499>
- Rodríguez A, Bodí M, Bruhn A, Gordo F, Magret Iglesias M, Fin N y Ríos F. Ventilación mecánica. Fisiopatología respiratoria aplicada. 1ª ed. Buenos Aires: Journal, 2017. 248p.
- Sánchez Sánchez M, Asensio Martínez MJ, Alfageme M y Herrero E. Monitorización del paciente ventilado. REMI: Libro Electrónico de Medicina Intensiva [revista on-line], 2011 [consultado en noviembre de 2018]. Disponible: <http://www.medicina-intensiva-libro.com/search/label/Monitorizaci%C3%B3n%20respiratoria>
- West JB. Fisiología Respiratoria. 7ª ed. Madrid: Editorial Médica Panamericana; 2005. 202p.