



## CAPÍTULO 2

# Capnografía

### Capnografy

**Gloria Cecilia Silva Gordillo**

Clínica Imbanaco, Colombia, Cali

© <https://orcid.org/0000-0003-0019-6579>

✉ [glosilva2001@yahoo.com](mailto:glosilva2001@yahoo.com)

## Resumen

En el siguiente capítulo se abordará la fisiología del CO<sub>2</sub>, la historia de la capnografía, permitiéndonos ver los avances en este tipo de monitora a través del tiempo, así mismo, la definición entre capnografía y capnometría además, conocer los diferentes equipos que existen y las diferencias entre cada uno de ellos, de igual manera, reconocer el tipo de gráfica que produce en cada situación clínica del paciente, lo que permitirá identificar los problemas en el paciente ventilado mecánicamente permitiendo dar soluciones al evento en el paciente. Por otra parte, conocer sus indicaciones y finalmente se abordará estudios relacionados con este tipo de monitoría.

**Palabras claves:** capnografía, dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, EtCO<sub>2</sub>.

## Abstract

In the next chapter, the physiology of CO<sub>2</sub>, the history of capnography, will be addressed, allowing us to see the advances in this type of monitor over time, as well as the definition between capnography and capnometry, in addition, knowing the different equipment that exists and the differences between each of them, in the same way, recognize the type of graph that is produced in each clinical situation of the patient, which will allow identifying

*Cita este capítulo / Cite this chapter*

Silva Gordillo GC. Capnografía. En: Estupiñán Pérez VH, editor científico. Monitoreo gráfico y ventilatorio en la Unidad de Cuidados Intensivos (UCI). Cali, Colombia: Universidad Santiago de Cali; 2024. p. 57-122.

the problems in the mechanically ventilated patient, allowing solutions to the event in the patient. On the other hand, know its indications and finally studies related to this type of monitoring will be addressed.

**Keywords:** capnography, carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, EtCO<sub>2</sub>.

## Introducción

La capnografía es una herramienta no invasiva de forma continua valiosa en la monitorización del paciente ventilado, esta se puede complementar con la pulsioximetría, y la monitoria grafica que se encuentra en ventilación mecánica, la capnografía en parte mide la ventilación del paciente a través de CO<sub>2</sub> exhalado, además, refleja el metabolismo del paciente. Aunque también, puede ser utilizada durante la reanimación cardiopulmonar, y durante la intubación orotraqueal permitiendo de manera rápida identificar si el tubo orotraqueal se encuentra en la tráquea. El objetivo de este capítulo es abordar el concepto de capnografía y conocer su utilidad.

### Fisiología del Dióxido de Carbono

La cinética del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) tiene un comportamiento unidireccional, que comienza con la producción aeróbica o anaeróbica a nivel tisular, continúa con su transporte a través del flujo sanguíneo y finaliza con su eliminación, principalmente a través de la ventilación alveolar (1). El CO<sub>2</sub> deriva del producto del metabolismo celular y se acumula en el organismo en forma de depósitos. La producción de CO<sub>2</sub> en condiciones basales es de aproximadamente 250 ml/min (1).

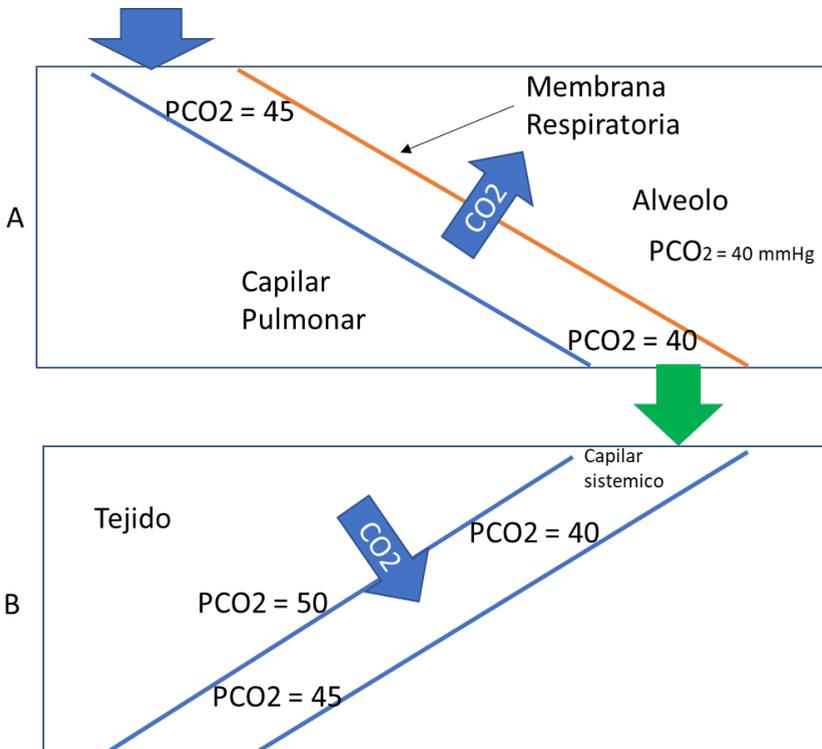
Se difunde de las células a la sangre y se transporta a los pulmones por retorno venoso (esencialmente igual al gasto cardíaco [QT]), y eliminado del pulmón por ventilación minuto (VE). En este modelo, el pulmón es una cámara de mezcla simple y el dióxido de carbono fraccional alveolar (FACO<sub>2</sub>) viene dado por  $FACO_2 = \frac{VCO_2}{\dot{V}A} + FICO_2$ , donde  $\dot{V}CO_2$ , ti es la producción tisular de dióxido de carbono,  $\dot{V}A$  es la ventilación alveolar y FICO<sub>2</sub> es la FCO<sub>2</sub> inspirada.  $\dot{V}A$  es el producto de la frecuencia respiratoria y el volumen corriente espirado (VT). El VT espirado se compone de VT alveolar y espacio muerto fisiológico total (VD<sub>phy</sub>) (2).

La presión parcial de dióxido de carbono en sangre arterial (PaCO<sub>2</sub>) en condiciones normales de circulación y ventilación, es de alrededor de

50 mmHg en tejidos, 45 mmHg en sangre venosa ( $PvCO_2$ ) y 40 mmHg en sangre arterial ( $PaCO_2$ ). La difusión de  $CO_2$  en los alvéolos se produce debido a la diferencia entre  $PvCO_2$  y  $PCO_2$  alveolar ( $PACO_2$ ) como se muestra en la Ilustración 40.

El  $PACO_2$  está regulado por varios factores basados en la ecuación de ventilación alveolar  $PACO_2 = k \times V \cdot CO_2 \times V \cdot A = k \times Q/V \cdot A \times (CV \cdot CO_2 - CCCO_2)$ . Donde  $k$  es constante,  $V \cdot CO_2$  es la excreción de  $CO_2$  (= producción de  $CO_2$  en estado estacionario),  $Q$  es el flujo sanguíneo pulmonar,  $V \cdot A$  es el volumen de ventilación alveolar,  $CV \cdot CO_2$  es la concentración de dióxido de carbono total en la sangre venosa mixta, y  $CCCO_2$  es la concentración de dióxido de carbono total en la etapa final de los vasos capilares pulmonares (3).

**Ilustración 40.** Fisiología del dióxido de carbono.



**Fuente:** Tomado de Pantazopoulos, C., et al. "A Review of Carbon Dioxide Monitoring During Adult Cardiopulmonary Resuscitation." *Heart, Lung and Circulation*, vol. 24, no. 11, 2015, pp. 1053-1061.

Nota: a) Difusión de dióxido de carbono en la membrana respiratoria; b) Difusión de dióxido de carbono en los tejidos.

El dióxido de carbono al final de la espiración es la concentración de dióxido de carbono en el aire exhalado al final de la espiración que se expresa como presión parcial en mmHg ( $PEtCO_2$ ). Se mide mediante capnógrafos y está influenciado por la circulación, la ventilación y el metabolismo. Con un flujo sanguíneo pulmonar y ventilación normales, los niveles de  $EtCO_2$  se aproximan a los niveles de  $PaCO_2$ , es decir, 35-45 mmHg. Si la producción de  $CO_2$  y la ventilación alveolar son constantes,  $EtCO_2$  refleja la circulación sistémica y pulmonar, mientras que una disminución del gasto cardíaco conduce a una disminución de la perfusión pulmonar y  $EtCO_2$ . En el paciente anestesiado e intubado, el gradiente entre  $EtCO_2$  y  $PaCO_2$  es de hasta 6 mmHg; en el paciente despierto, no intubado, el gradiente es de 0-2 mmHg (3).

Durante el funcionamiento normal del cuerpo, el  $CO_2$  alto en los músculos y órganos ayuda a que la hemoglobina libere el oxígeno necesario, conocido como el efecto Bohr, sin embargo, los períodos prolongados de niveles elevados de  $CO_2$  y la acidosis asociada dificultan que la hemoglobina recoja y transporte oxígeno. Esto genera un desplazamiento de la curva de disociación de la oxihemoglobina hacia la derecha.

Por el contrario, si el paciente tiene niveles bajos de  $CO_2$ , debido a la hiperventilación, se aumentará la afinidad por el oxígeno, lo que permite que la hemoglobina tome oxígeno con mayor facilidad. Sin embargo, si el nivel bajo de  $CO_2$  se prolonga, es posible que la hemoglobina no libere el oxígeno a los órganos. Esto se denomina efecto Haldane y se ve como un desplazamiento de la curva de disociación de la oxihemoglobina hacia la izquierda.

En este caso, es posible que tenga una lectura de oximetría de pulso “normal” aunque los órganos no estén recibiendo el oxígeno porque la hemoglobina está saturada de oxígeno, pero este oxígeno permanece “bloqueado” en la hemoglobina. De esta forma la lectura de  $EtCO_2$  ayuda a interpretar mejor la validez y el significado de otros signos vitales como la oximetría de pulso, la presión arterial, entre otros (4).

En conclusión, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), uno de los productos finales de la respiración, se transporta en el torrente sanguíneo a los pulmones, donde ingresa a los alvéolos y se expulsa de los pulmones durante la espiración. La medición del  $CO_2$  espirado proporciona información sobre el metabolismo, el gasto cardíaco y la ventilación (5).

## Generalidades Básicas de la Capnografía

La capnografía determina la concentración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en los gases exhalados por el paciente mediante muestreo de gas de flujo lateral medido por tecnología infrarroja para detectar  $\text{CO}_2$  (6), esta medición no invasiva de los niveles de  $\text{CO}_2$  en sangre, proporciona información sobre la ventilación (eliminación efectiva del dióxido de carbono [ $\text{CO}_2$ ], la perfusión (transporte de  $\text{CO}_2$  en la vasculatura) y el metabolismo (producción de  $\text{CO}_2$  a través del metabolismo celular) en pacientes intubados y con respiración espontánea (7), aumento en los niveles de  $\text{CO}_2$  denota hipoventilación y son un signo de alerta temprana de hipoxemia posterior (8).

La capnografía es una herramienta no invasiva que es conocida por su versatilidad. Tradicionalmente ha sido utilizado por los médicos anestesiólogos y emergenciólogos para comprobar la colocación del tubo endotraqueal, monitorear la acidosis respiratoria y como medida preventiva para evitar la narcosis de  $\text{CO}_2$  (9). La evaluación continua de la adecuación de la ventilación por capnografía es un estándar para el monitoreo anestésico básico (Aprobado por la Cámara de delegados de la Sociedad Estadounidense de Anestesiólogos) (10), se utiliza para monitorear el flujo sanguíneo sistémico, pulmonar y coronario. Durante la monitorización con capnografía, el gasto cardíaco y el  $\text{CO}_2$  al final de la espiración ( $\text{EtCO}_2$ ) tienen una relación logarítmica. En consecuencia,  $\text{EtCO}_2$  es un indicador sensible del flujo sanguíneo pulmonar (6).

A lo largo de los años, el uso se expandió hacia el estudio del metabolismo, la circulación, la perfusión y difusión pulmonar, la calidad de la respiración espontánea y la permeabilidad de las vías respiratorias fuera de su utilización típica en el campo de la anestesia y la medicina de emergencia (9). En las últimas décadas, la capnografía se ha convertido en un componente esencial para la monitorización del paciente intubado y no intubado; además, la evaluación de la ventilación, la monitorización del  $\text{CO}_2$  exhalado puede proporcionar información valiosa sobre la seguridad del paciente, datos fisiológicos críticos con respecto a la ventilación y la perfusión pulmonar, el gasto cardíaco y la tasa metabólica e influencia y predicción de los resultados de la atención (11).

Clínicamente, capnografía se puede utilizar tanto en enfermedades pulmonares como no pulmonares (9). Los intereses de investigación radican en espectros broncoespásticos como el asma (12, 13), la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (14, 15), la fibrosis quística (16, 17) y la dis-

plasia broncopulmonar (DBP) (18, 19). También se ha usado la capnografía en el diagnóstico de embolia pulmonar (EP) (20, 21).

Para las enfermedades no pulmonares, la capnografía ha sido una herramienta confiable para monitorear varias afecciones (9). Un ejemplo destacado sería el retorno de la circulación espontánea (ROSC), durante una reanimación cardiopulmonar (RCP) eficaz, se ha demostrado que el  $\text{CO}_2$  al final de la espiración se correlaciona con el gasto cardíaco, la presión de perfusión coronaria, la eficacia de la compresión cardíaca, el ROSC e incluso la supervivencia (22). También hay otros usos emergentes de la capnografía como su valor pronóstico en pacientes con insuficiencia cardíaca (23).

La capnografía es una importante tecnología de seguridad del paciente que monitorea la adecuada ventilación en pacientes soportados con ventilación mecánica y en aquellos que reciben medicamentos de sedación o anestesia que pueden deprimir la respiración. La presencia y la cantidad de  $\text{EtCO}_2$  puede también puede ser usado para evaluar la efectividad de la reanimación (5).

## Historia

La capnografía es la monitorización continua y no invasiva de la ventilación que mide el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) exhalado por el paciente. Elam et al, en el año 1955 investigaron sobre la homeostasis del dióxido de carbono durante la anestesia, siendo entre los primeros en informar sobre la capnografía registrada simultáneamente y los perfiles de flujo de la respiración humana. Su trabajo fue publicado en una serie de 4 artículos (I. Instrumentación, II. Muestreo total para determinación de espacio muerto, ventilación alveolar y salida de dióxido de carbono, III. Ventilación y eliminación de dióxido de carbono y IV. Una evaluación del sistema de reinhalación parcial (24-27).

Esa investigación incluyó características normales y anormales del perfil capnográfico y mediciones del espacio muerto y la ventilación alveolar. En 1957, Smalhout, quien es considerado por muchos el padre de la capnografía clínica, comenzó a usar capnógrafos mientras trabajaba en el Hospital Militar Central de Utrecht, Países Bajos. Durante un período de 7 años previo a la publicación de su tesis doctoral en 1967, Smalhout recolectó aproximadamente 6000 capnogramas, que documentaron numerosas variaciones de forma (28).

En 1981, Smalhout y Kalenda publicaron un atlas que ilustraban muchas de las aplicaciones de la capnografía, siendo uno de los primeros estudios documentados  $\text{CO}_2$  exhalado, desde ese momento se ha venido empleando para

monitorizar a pacientes intubados en el entorno hospitalario, primero en Europa y posteriormente en los años 80 en Estados Unidos (29). Desde la década de 1990, la capnografía se ha utilizado para un número cada vez mayor de condiciones clínica, procedimientos y seguimiento.

La American Society of Anesthesiologists (ASA) desde 1991 considera que el estándar de atención en el quirófano es la monitorización conjunta de la capnografía y la pulsioximetría. El American College of Emergency Physicians (ACEP) desde 1995 indica el uso de rutina de la capnografía en el paciente intubado, tanto en el medio hospitalario como extrahospitalario(30).

La American Heart Association (AHA) recomienda su uso desde el año 2000 durante la parada cardiorrespiratoria y el tratamiento cardiovascular urgente, tanto intra como extrahospitalario. Desde el 2002, en Europa la Intensive Care Society considera que la capnografía es un estándar de atención en el transporte del paciente crítico adulto. Desde el 2005, el European Resuscitation Council (ERC) recomienda su uso para verificar la correcta colocación del tubo endotraqueal (TET) durante la parada cardiorrespiratoria (30).

Finalmente, el European Committee for Standardization en el año 2007 elaboró los estándares europeos para las ambulancias terrestres, incluyendo un capnómetro dentro del equipamiento necesario de las ambulancias tipo C (unidades móviles de emergencia o UVI móviles) (30).

Los cambios en la concentración de  $\text{CO}_2$  pueden ayudar a los médicos en una variedad de condiciones, incluida la evaluación de la gravedad de la enfermedad, calidad de la compresión, retorno de la circulación espontánea, colocación del tubo endotraqueal, pronóstico, sedación para procedimientos, enfermedad crítica, entre otros (7).

### **Capnometría Versus Capnografía**

Existe una confusión considerable debido a la terminología inconsistente que se aplica al análisis médico del  $\text{CO}_2$ . Con el fin de evitar errores, es necesario comprender en primer lugar la diferencia entre la capnografía y la capnometría. En un sentido muy general, la capnografía se refiere no solo al método de medición de  $\text{CO}_2$ , sino también a su visualización gráfica en función del tiempo o el volumen. Sin embargo, la capnometría se refiere a la medición y cuantificación de las concentraciones de  $\text{CO}_2$  inhalado o exhalado en la apertura de las vías respiratorias (2). En conclusión, la capnografía produce una curva gráfica del  $\text{CO}_2$  al final de la espiración, mientras que la capnometría proporciona una representación numérica de esta concentración (31).

## Tipos de Capnografía

Se han desarrollado distintos métodos de medida del  $\text{CO}_2$  exhalado que difieren en la forma de medirlo. La medición de la presión parcial del  $\text{CO}_2$  respecto al tiempo se conoce como “capnografía temporal” y La monitorización del volumen espirado conoce como “capnografía volumétrica (respectivamente, Ilustración 42 A y B) (30, 32).

La capnografía basada en volumen proporciona información similar a la capnografía de tiempo, pero traza presión espirada mixta de  $\text{CO}_2$  ( $P_{\text{eCO}_2}$ ) contra el volumen corriente exhalado ( $V_T$ ), lo que permite un cálculo más preciso de la producción de medir el espacio muerto ( $V_D$ ) y  $\text{CO}_2$  (11,33), pero requiere medir el flujo instantáneamente; esto conlleva un mayor costo, un sensor convencional y más complejidad, lo que impide su uso generalizado en el monitoreo rutinario en la unidad de cuidados intensivos, aunque actualmente está disponible en algunos ventiladores comerciales y como monitores independientes (32, 33). El análisis de las fases del capnograma volumétrico, la forma y la morfología de la curva, y las mediciones basadas en cálculos del capnograma volumétrico pueden revelar información importante con respecto a la eficiencia de la ventilación y la perfusión, la fracción fisiológica del espacio muerto y la tasa metabólica del paciente (11).

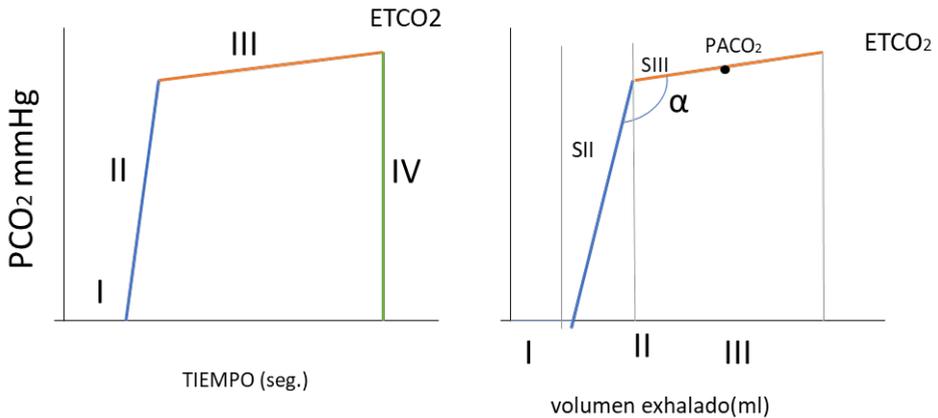
La capnografía volumétrica integra el  $\text{CO}_2$  al volumen del gas espirado, permitiendo así obtener el registro de diversas variables fisiológicas como las relacionadas a la ventilación y perfusión alveolar, que al ser incorporados a la práctica clínica en la atención de los pacientes con insuficiencia respiratoria permite un monitoreo sin precedentes mediante su uso en la programación personalizada del ventilador mecánico y en la estratificación de riesgos. Cuando se utiliza en todo su potencial, la capnografía volumétrica proporciona una gran cantidad de información sobre el metabolismo, fisiología respiratoria y cardiovascular (1).

Sin embargo, su uso adecuado exige que el personal disponga de conocimientos fisiológicos sobre la cinética del  $\text{CO}_2$ , especialmente en la relación  $V/Q$ , este familiarizado con los conceptos de espacio muerto fisiológico, alveolar y anatómico; ya que los resultados obtenidos, se encuentran influenciados por múltiples variables relacionados con el metabolismo celular y gasto cardíaco, evitando así interpretaciones erróneas de los resultados que conduzcan a estrategias ventilatorias potencialmente nefastas para los pacientes (1).

Por otro lado, la capnografía de tiempo está fácilmente disponible en la mayoría de las UCI, pero no tiene en cuenta los flujos espiratorios (32). La capnografía de tiempo se usa más comúnmente en la práctica clínica. Un capnograma de tiempo tiene dos segmentos importantes: inspiratorio (fase 0) y espiratorio. El segmento espiratorio se divide además en tres fases (I, II, III) y una fase IV ocasional (Ilustración 41, Tabla 6), basado en la fisiología de la evolución del dióxido de carbono de los pulmones y las vías respiratorias (34).

El capnograma de volumen presenta concentración de  $\text{CO}_2$  en relación con el volumen caducado y se divide en 3 fases similares (carente de una fase IV ya que no se traza la inspiración; Ilustración 42B). La Fase I se refiere al vaciado del espacio muerto anatómico. La fase II refleja la transición del espacio muerto de las vías respiratorias a los alvéolos proximales, mientras que la fase III se refiere al vaciado alveolar. La importancia de las formas de estas tres fases es similar a las de la capnografía temporal, pero la pendiente de la fase III es más pronunciada porque el flujo espiratorio cae exponencialmente a lo largo de la espiración (32).

**Ilustración 41.** Capnografía de Tiempo y Volumen.



**Fuente:** Tomado de Nassar, B. S., and Schmidt, G. A. “Capnography During Critical Illness.” *Chest*, vol. 149, no. 2, 2016, p. 576-585.

La principal diferencia entre la capnografía convencional y volumétrica, es que esta última permite medir el volumen de  $\text{CO}_2$  espirado por respiración ( $\text{VTCO}_2$  br) o por minuto ( $\text{VCO}_2$ ), conllevando así a una serie de cálculos matemáticos que permiten estimar el espacio muerto y la ventilación alveo-

lar en forma dinámica y no invasiva (1). El espacio muerto es un componente importante de las anomalías de ventilación-perfusión.

La medición del espacio muerto tiene aplicaciones diagnósticas, pronósticas y terapéuticas. En la unidad de cuidados intensivos, la medición del espacio muerto se puede utilizar para guiar el tratamiento de los pacientes con síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA); en el servicio de urgencias puede orientar la terapia trombolítica para la embolia pulmonar; en pacientes perioperatorios puede indicar el éxito de las maniobras de reclutamiento (35).

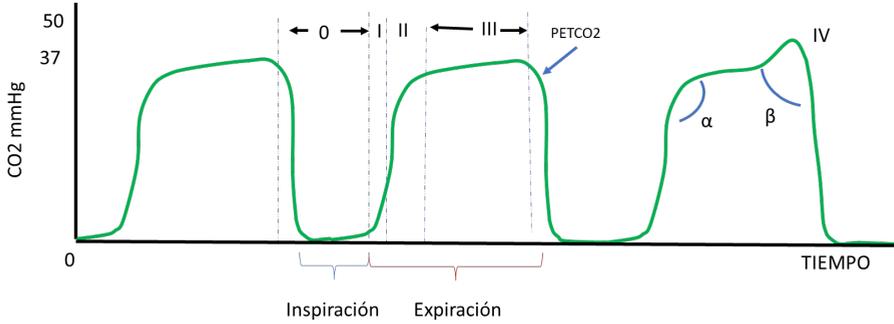
La medición del espacio muerto podría potencialmente proporcionar un parámetro para que los médicos sigan en las fases tempranas (dentro de las 24 horas) o intermedias (dentro de una semana) del SDRA. Su monitorización puede ayudar a determinar el mejor nivel de presión positiva al final de la espiración (PEEP) evaluando la sobredistensión y colapso alveolar (35).

### Capnograma

El capnómetro produce un capnograma que muestra la forma de onda gráfica continua de la presión parcial de  $\text{CO}_2$  a lo largo del tiempo (36). El valor adicional de monitoreo clínico de la capnografía es la capacidad de interpretar visualmente la forma de onda y la morfología del capnograma (11). La Ilustración 42 muestra un perfil típico de concentración de  $\text{CO}_2$  para tres respiraciones en función del tiempo. El capnograma consta de dos componentes principales, inspiratorio y espiratorio, que se pueden dividir en cuatro fases diferentes (Tabla 6) (37).

La interpretación requiere la consideración de tres aspectos de la capnografía: el número máximo o meseta de  $\text{EtCO}_2$ , la forma del capnograma y la diferencia o gradiente entre  $\text{EtCO}_2$  y la presión arterial de  $\text{CO}_2$  (7). Los cambios en la forma del capnograma son diagnósticos de las condiciones de la enfermedad, mientras que los cambios en el  $\text{CO}_2$  espiratorio final ( $\text{EtCO}_2$ ) se pueden utilizar para evaluar la gravedad de la enfermedad y la respuesta al tratamiento (38).

**Ilustración 42.** Representación del Capnograma para Tres Respiraciones.



**Fuente:** Tomado de Kaczka, D.W., et al. “Respiratory Monitoring.” In: Gropper, M.A., editor. *Miller Anesthesia*, 9th ed., 2021, pp. 1298-1339.

**Nota:** El segmento espiratorio está dividido en fase I, II, III y IV. El segmento inspiratorio se refiere a la fase 0 en la ilustración 42 denota el ángulo entre la fase II y III, mientras denota el ángulo entre la fase III y el brazo descendente de la fase 0. La fase IV (la línea en rayitas en la 3 respiración) denota un ascenso observado al final de la fase III en algunos pacientes. PETCO<sub>2</sub>, Presión parcial end-tidal CO<sub>2</sub>.

Los factores que afectan la capnografía incluyen la producción de CO<sub>2</sub>, el transporte de CO<sub>2</sub>, la ventilación y los cambios en la relación ventilación-perfusión. La configuración y el mal funcionamiento del ventilador, las desconexiones y fugas, la obstrucción de los tubos, el método de muestreo y el sitio, la frecuencia de muestreo y el mal funcionamiento del monitor también pueden afectar las lecturas de capnografía (7). Las patologías pulmonares cambiarán la apariencia del capnógrafo debido a una serie de factores diferentes broncoconstricción y obstrucción del flujo de aire, destrucción de los alvéolos, un aumento en el rango de las constantes de tiempo alveolar (alvéolos que se vacían a diferentes velocidades) y un aumento en / spread (variación del contenido de CO<sub>2</sub> de cada alvéolo). Como resultado, la pendiente de la fase III a menudo aumenta notablemente en la enfermedad respiratoria (37).

Un capnograma normal (Ilustración 43) representa un patrón de onda cuadrada que consta de cuatro fases (Tabla 6), que revela la concentración de CO<sub>2</sub> durante el periodo de respiración (36). Los principales determinantes de EtCO<sub>2</sub> incluyen la ventilación alveolar, la perfusión pulmonar y la producción de CO<sub>2</sub> (39). La medición máxima al final de la fase III es la lectura de EtCO<sub>2</sub>, cuyo valor objetivo es de 35 a 45 mmHg, con una tasa típica de venti-

lación para un adulto que respira espontáneamente de 12 a 20 respiraciones por minuto (10). Las tendencias en el valor, la tasa y el patrón de forma de onda de EtCO<sub>2</sub> deben ser estables para los adultos sanos (36).

**Tabla 6.** Fases de la Capnografía.

Segmento	Fase	Explicación
Inspiración	0	Comienza la inspiración, con la eliminación de CO <sub>2</sub> .
	Ángulo β	Situado entre la fase III y la parte descendente de la inspiración, normalmente 90 grados.
Expiración	I Línea de base inspiratoria	Representa la inspiración y, por lo tanto, no se detecta CO <sub>2</sub> . Consiste en espacio muerto anatómico. No debe contener CO <sub>2</sub> . Debido a que los gases iniciales expirados se originan en el espacio muerto no ventilado, la traza de capnografía permanece en cero. El final de la fase I representa el comienzo de la expiración.
	II Ascenso espiratorio	Representa la expiración tanto del gas del espacio muerto como del gas alveolar de los bronquiolos respiratorios y los alvéolos. Rápido aumento de la concentración de CO <sub>2</sub> a medida que la respiración llega a las vías respiratorias superiores desde los alvéolos. Mezcla de espacio muerto anatómico y alveolar.
	III Meseta alveolar	Representa la expiración de los gases alveolares. La concentración de CO <sub>2</sub> alcanza niveles uniformes en las vías respiratorias - corresponde a la exhalación de CO <sub>2</sub> del aire procedente de los alveolos, observándose un ascenso lento y progresivo hasta alcanzar el punto donde la presión parcial de CO <sub>2</sub> es máxima. La altura y la pendiente de la línea ofrecen información importante sobre las relaciones de ventilación y perfusión en los pulmones. Altura relacionada con el gasto cardíaco. Al final de la fase III, el valor máximo de CO <sub>2</sub> medido es equivalente al EtCO <sub>2</sub> .
	Ángulo α	Situado entre la fase II y III, normalmente a 100 grados.

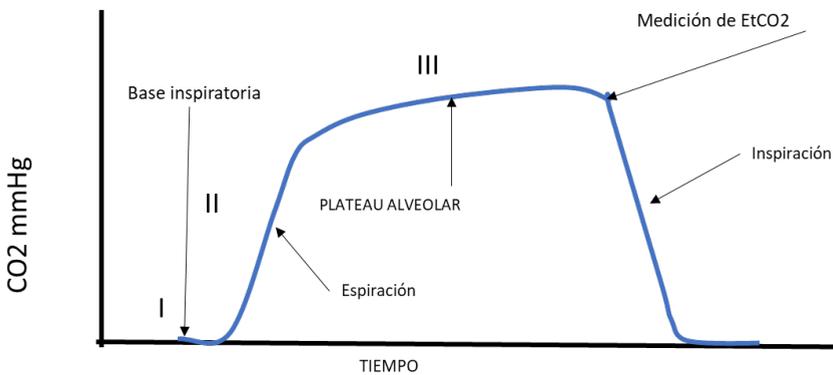
Segmento	Fase	Explicación
Expiración	IV Descenso espiratorio	Representa el comienzo de la siguiente respiración, con el contenido de CO <sub>2</sub> volviendo rápidamente a cero. En la que la presión parcial de CO <sub>2</sub> decrece rápidamente al inicio de la inspiración.

**Fuente:** elaboración propia basada en Long, B., Koyfman, A., & Vivirito, M. A. “Capnography in the Emergency Department: A Review of Uses, Waveforms, and Limitations.” *J Emerg Med*, vol. 53, no. 6, 2017, pp. 829-842; Kerslake, I., & Kelly, F. “Uses of Capnography in the Critical Care Unit.” *BJA Education*, vol. 17, no. 5, 2017, p. 178-183.

Un capnograma, ya sea basado en el tiempo o en el volumen, solo presenta una instantánea. Incluso un gráfico de tendencia de varios minutos no representa más que un breve episodio de una fase la enfermedad del paciente. A menudo se recurre a la capnografía para ayudar al diagnóstico y a la interpretación de un proceso agudo (intubación, embolia, broncoespasmo, ajuste de la ventilación, infusión de bicarbonato, etc.) (40).

El organismo dispone de innumerables mecanismos para compensar las alteraciones. Estos esfuerzos correctivos se superponen y se realizan a diferentes velocidades, algunos tardan unas pocas respiraciones y otros, días en alcanzar un nuevo equilibrio. Pueden afectar al gasto cardíaco, al flujo sanguíneo pulmonar, a la ventilación, al equilibrio ácido-base y a la fisiología renal (40).

**Ilustración 43.** Trazo de capnograma normal.



**Fuente:** Tomado de Huang, C. H., & Wei, K. H. “Applications of Capnography in Airway Management Outside the Operating Room.” *Signa Vitae*, vol. 17, no. 4, 2021, pp. 18-24.

**Nota:** La Fase I es la línea de base inspiratoria, con un bajo nivel de  $\text{CO}_2$  durante la inspiración. La fase II es el golpe ascendente espiratorio. La fase III es la meseta alveolar, que refleja el flujo espiratorio alveolar, que alcanza su punto máximo al final de la espiración corriente ( $\text{EtCO}_2$ ). La fase 0 es el descenso inspiratorio.

## Interpretación de Capnografía

En capnografía la información clínica se puede obtener de tres fuentes: valor numérico de  $\text{PEtCO}_2$ , forma de los capnogramas y la diferencia entre  $\text{PEtCO}_2$  y  $\text{PaCO}_2$ . Los valores numéricos deben utilizarse como herramienta en el diagnóstico diferencial (Tabla 7) y las formas de los capnogramas ofrecen pistas diagnósticas más específicas (34). El valor numérico y la forma del capnógrafo continuo proporcionan información importante sobre la producción de  $\text{CO}_2$ , la perfusión pulmonar, la ventilación alveolar y el mal funcionamiento del equipo, lo que permite un diagnóstico temprano y la intervención de anomalías inminentes. El valor numérico es una estimación de  $\text{PaCO}_2$ , el único indicador de adecuada ventilación. La curva de capnografía que se usa para supervisar la perfusión de órganos debido a la relación directamente proporcional entre  $\text{EtCO}_2$  y el gasto cardíaco (6). Solo la forma de capnografía normal tiene un patrón de onda cuadrada y, por lo tanto, cualquier variación debida a anomalías se puede descifrar al comprender cómo se forma cada componente de la traza (41).

Es difícil utilizar la capnografía como herramienta de diagnóstico por sí sola. Sin embargo, si los cambios en  $\text{PEtCO}_2$  y las formas de onda del dióxido de carbono se utilizan junto con los datos de frecuencia cardíaca, presión arterial, flujo respiratorio, presión de inflación pulmonar y volumen por minuto, se puede mejorar la precisión diagnóstica de la capnografía (34).

**Tabla 7.** Diagnostico Diferencial de Valores de  $PEtCO_2$   
Crecientes o Decrecientes.

<b>Causas de una <math>PEtCO_2</math> anormal</b>	<b>Aumento de la <math>PEtCO_2</math></b>	<b>Disminución de la <math>PEtCO_2</math></b>
Metabolismo	Recuperación de la anestesia (escalofríos) Hipertermia Neurolépticos Síndrome maligno Crisis tirotóxica Sepsis grave	Hipotermia Acidosis metabólica
Circulatorio	Liberación del torniquete Insuflación de dióxido de carbono Laparoscopia Tratamiento de la acidosis	Inducción de la anestesia Embolia pulmonar Hipovolemia profunda Shock cardiogénico Shock hemorrágico Derivación intracardiaca
Respiratorio	Hipoventilación Asma	Edema pulmonar Derivación intrapulmonar Hiperventilación
Técnica	Absorbedor de dióxido de carbono agotado Contaminación del monitor	Desconexión Obstrucción en tubos

**Fuente:** Kodali, Bhavani S. "Capnography Outside the Operating Rooms." *Anesthesiology*, vol. 118, no. 1, 2013, pp. 192-201.

La evaluación de la forma de onda y el valor de la capnografía puede ser sencilla. La evaluación de la forma de onda incluye la altura, la frecuencia, el ritmo, la línea base y la forma, las condiciones para tener en cuenta al disminuir o aumentar los niveles de  $EtCO_2$  se mencionaron en la Tabla 7 (7). Es recomendable usar un algoritmo o proceso sistemático para el análisis. Esto se puede dividir en varios pasos (39):

1. Buscar la presencia de CO<sub>2</sub> exhalado (¿Hay una forma de onda presente?).
2. Establecer la línea de base inspiratoria (¿Hay reinhalación?)
3. Identificar (¿Cuál es la forma, es decir, empinada, inclinada o prolongada?)
4. Meseta respiratoria/alveolar (¿Es inclinada, empinada o prolongada?)
5. El trazo inspiratorio (es inclinado, empinado o prolongado)

Los cambios dentro de los componentes se pueden utilizar para determinar la gestión adecuada, ya sea relacionada con el paciente o debido a un mal funcionamiento del equipo. Las anomalías que afectan los componentes de la capnografía se resumen en la Tabla 8. Un aumento en la línea de base durante la fase I, también mostrado como un aumento numérico en el CO<sub>2</sub> inspirado, implica reinhalación causada por un tiempo espiratorio insuficiente, un flujo inspiratorio inadecuado, una válvula espiratoria defectuosa o el agotamiento del absorbedor de CO<sub>2</sub>. Una reducción en la pendiente del golpe ascendente espiratorio demuestra una obstrucción al flujo espiratorio que puede deberse a obstrucción del tubo endotraqueal, torcedura o broncoespasmo. Un cambio en la tendencia de la altura del capnógrafo se correlaciona con la adecuación de la ventilación alveolar, la producción de CO<sub>2</sub> y los cambios de ventilación/perfusión relacionados con la anestesia.

Un aumento consecutivo de la altura es uno de los primeros indicadores de hipertermia maligna debido a la producción metabólica anormalmente alta de CO<sub>2</sub>. Un cambio en el ritmo refleja la insuficiencia de la relajación muscular a medida que regresa el movimiento diafragmático y, finalmente, múltiples cambios en el patrón de ventilación, la frecuencia y el volumen corriente pueden afectar la forma de la señal debido al cambio en el espacio muerto. A medida que aumenta la tasa respiratoria y disminuye el tamaño del volumen corriente, como se ve en los bebés pequeños y niños, los aumentos resultantes en el espacio muerto reducen la eficiencia de la eliminación de CO<sub>2</sub>. Esto se estima mejor utilizando capnografía volumétrica para luego impulsar la estrategia de ventilación, pero esta técnica no se utiliza en los entornos de anestesia actuales (41).

**Tabla 8.** Anomalías que Afectan a los Componentes de la Forma de Onda del Capnógrafo.

<b>Anomalía</b>	<b>Aumento de la línea de base</b>	<b>Altura de la meseta</b>	<b>Reducción de la pendiente ascendente de la fase II</b>	<b>Cambio de ritmo</b>
<b>Técnica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reinalación</li> <li>• Absorbedor de CO2 agotado</li> <li>• Válvula defectuosa</li> <li>• Flujo inspiratorio inadecuado</li> <li>• Tiempo espiratorio insuficiente</li> </ul>	<p>Ausente</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tiempo de respuesta largo</li> <li>• tiempo de caducidad demasiado corto</li> </ul> <p>Irregular</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• relajante muscular que desaparece</li> </ul>	<p>Tubo orotraqueal</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Torcedura / Obstrucción</li> <li>• Extubación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desconexión</li> <li>• Mal funcionamiento del ventilador</li> <li>• Extubación</li> </ul>
<b>Producción de CO2</b>		<p>Aumento de</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hipertermia maligna</li> </ul> <p>Disminución de</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Intubación esofágica</li> <li>• Hipotermia</li> <li>• Fuga del manguito</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sepsis</li> </ul>
<b>Ventilación alveolar</b>		<p>Aumento de</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hipoventilación</li> </ul> <p>Disminución de</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hiperventilación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prematuridad</li> <li>• Síndrome de dificultad respiratoria</li> <li>• Broncoespasmo</li> </ul>	
<b>Perfusión pulmonar</b>		<p>Aumentar</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ROSC tras la parada cardíaca</li> <li>• Hipertensión</li> </ul> <p>Disminuye</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hipotensión</li> <li>• Embolia pulmonar</li> <li>• Reducción del gasto cardíaco</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acidosis metabólica</li> </ul>

**Fuente:** Traducido de Humphreys, S., Schibler, A., & von Ungern-Sternberg, B. S. "Carbon Dioxide Monitoring in Children-A Narrative Review of Physiology, Value, and Pitfalls in Clinical Practice." *Paediatr Anaesth*, vol. 31, no. 8, 2021, p. 839-845.

El gradiente  $\text{PaCO}_2\text{-PEtCO}_2$ , un sustituto del espacio muerto fisiológico es valioso para evaluar la relación  $V/Q$ . Un gradiente cambiante denota hemodinámica circulatoria inestable o ventilación alveolar variable como resultado de cambios dinámicos en el cumplimiento o la resistencia en los pulmones. Si el gradiente se estabiliza en el transcurso del tratamiento clínico, se puede conjeturar que se ha logrado la estabilidad de la ventilación alveolar y la perfusión (34).

El valor de  $\text{EtCO}_2$  en pulmones normales es aproximadamente de 2 a 5 mm Hg menor que la  $\text{PaCO}_2$ . Si los pulmones están enfermos con enfermedad pulmonar obstructiva crónica, esta diferencia puede ser mucho mayor, ya que hay un desajuste de perfusión de ventilación ( $V/Q$ ) en los pulmones. El capnograma normal para un paciente con pulmones normales es una forma de onda casi cuadrada que sigue la frecuencia respiratoria. Los pacientes con asma y los pacientes con bronquitis que tienen dificultad con la espiración mostrarán una onda ascendente aplanada (5).

La hipoventilación o la respiración superficial pueden causar una disminución de la  $\text{EtCO}_2$ , ya que tal vez solo haya ventilación del espacio muerto si es grave, pero cuando se produce una respiración profunda, se observará una  $\text{EtCO}_2$  alta. Otras causas de un  $\text{EtCO}_2$  alto son la hipoventilación, la fiebre y la liberación de un torniquete, mientras que un  $\text{EtCO}_2$  bajo puede reflejar hiperventilación, gasto cardíaco bajo, hipotensión, embolia pulmonar o paro cardíaco (5).

### **Limitaciones de la Capnografía**

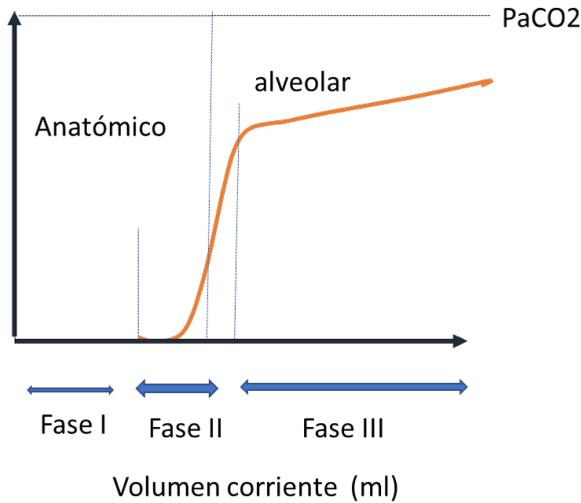
Los pacientes con fisiopatología mixta presentan desafíos para la interpretación. Por ejemplo, un déficit de perfusión puede reducir el  $\text{EtCO}_2$ , mientras que un déficit de ventilación puede elevar el valor. En pacientes pediátricos y recién nacidos la interpretación de  $\text{EtCO}_2$  puede verse afectado por volúmenes corrientes bajos, que pueden caer por debajo del caudal y disminuir el valor de  $\text{EtCO}_2$ . En el paro cardíaco, el  $\text{EtCO}_2$  no solo depende de las compresiones, sino que también puede verse afectado por la etiología del paro (cardíaco, embolia pulmonar, respiratorio, entre otros). La afectación de otros sistemas de órganos, incluida la hipotensión y la baja perfusión, puede afectar los niveles de  $\text{EtCO}_2$  (7).

Para el tratamiento de las anomalías pulmonares, donde el espacio muerto se convierte en un componente importante de la mala distribución de la ventilación/perfusión, la capnografía convencional puede ser insuficiente.

La capnografía volumétrica, a diferencia de la capnografía regular, evalúa la presión parcial de  $\text{CO}_2$  exhalado contra el volumen corriente exhalado, lo que permite la evaluación directa del volumen de los diferentes componentes del espacio muerto fisiológico, para informar la efectividad de las intervenciones diagnósticas y terapéuticas.

Las tres fases de la respiración exhalada en la capnografía volumétrica se muestran en la Ilustración 44. La fase I representa el volumen de gas libre de  $\text{CO}_2$  exhalado primero de las vías respiratorias, seguido de la fase II que muestra la mezcla de gas alveolar y espacio muerto y finalmente la fase III, gas alveolar (41).

**Ilustración 44.** Componentes del espacio Muerto en el capnógrafo Volumétrico.



**Fuente:** Tomado de Humphreys, S., Schibler, A., & von Ungern-Sternberg, B. S. “Carbon dioxide monitoring in children-A narrative review of physiology, value, and pitfalls in clinical practice.” *Paediatr Anaesth*, vol. 31, no. 8, 2021, p. 839-845.

### Forma de Onda de Capnografía

A pesar de las descripciones en la literatura de la forma de los capnogramas normales y obstructivos que se remontan a principios de la década de 1960, aún no existe una metodología estándar ampliamente aceptada o una biblioteca de formas de onda para diferenciar entre normales y anormales como existe por ejemplo con otras señales fisiológicas como el electrocardiograma (42).

Con el creciente uso clínico de la capnografía los investigadores han estudiado el valor del capnograma para la detección de enfermedades, la detección de afecciones anormales, la predicción de la mortalidad o los valores de parámetros determinados de forma invasiva y la clasificación de los pacientes en grupos, como la ICC, el EPOC, en función de las características del capnograma solo y en combinación con otras mediciones (42).

Esos estudios incluyeron el uso de valores únicos o promediados de los valores de  $PEtCO_2$  como sustituto del  $CO_2$  arterial y como predictor de supervivencia durante la RCP, así como cambios en el  $CO_2$  al final de la espiración para determinar los cambios en la condición clínica (por ejemplo, embolia pulmonar repentina). Se han definido métricas utilizando la forma o las propiedades estadísticas de la forma de onda para distinguir entre diferentes estados de enfermedad (42).

Actualmente, no existen métodos establecidos para digitalizar imágenes capnográficas para el análisis de datos, Vijayam, et al 2021 propusieron la digitalización y el análisis de la capnografía utilizando la técnica de procesamiento de imágenes como un medio para unir la conversión de señal analógica a digital para su utilización por médicos e investigadores por igual. Así mismo, como se mencionó hace unos años los valores normales de la mayoría de los parámetros e índices no se han establecido para el uso no invasivo (9).

Tanto las ondas del capnograma basado en el tiempo como el volumétrico se subdividen en tres fases (con una cuarta para la inspiración con el capnograma de tiempo) asociadas con la fuente de los gases espiratorios: (1) gas del espacio muerto; (2) gas de la transición entre el espacio muerto y el gas alveolar; y (3) gas del vaciado secuencial de los volúmenes alveolares(42).

A partir de estas formas de onda y las respectivas fases, se obtienen características basadas en el tiempo o el volumen, generalmente con una base fisiológica o clínica directa, como varios ángulos, pendientes, pendientes normalizadas, valores máximos, duraciones o volúmenes de cada fase, áreas y valores derivados. La terminología utilizada para las fases, las transiciones de fase, los ángulos y las pendientes es similar para el capnograma volumétrico y de tiempo; es importante tener cuidado con su uso, ya que no son equivalentes (42).

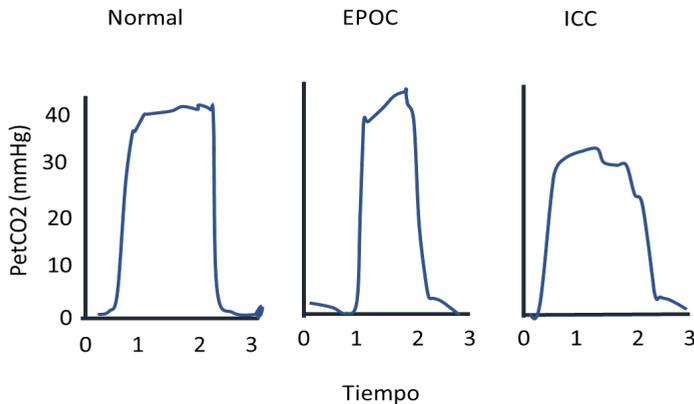
El uso de las características derivadas del capnograma permiten su clasificación en una de las clases predefinidas, esto puede consistir en (a) clasi-

ficación de formas de onda/detección de anomalías en tiempo real durante la monitorización (ej., anestesia) o (b) clasificación de un capnograma candidato en una de varias clases de enfermedades, como normal, EPOC o ICC. La eliminación de artefactos (ej., oscilaciones cardiogénicas) y/o la identificación de anomalías (ej., mal funcionamiento del equipo), son importantes identificarlas para reducir las falsas alarmas relacionadas con artefactos y la incidencia de registro de datos corruptos en el registro electrónico del paciente (42).

Los cambios en el capnograma sugieren cambios en la condición del paciente. La interpretación adecuada del capnograma puede alertar a un médico sobre cambios importantes y debe incluir al menos el examen de 3 características clave: línea de base a partir de cero; fuerte aumento de la concentración de  $\text{CO}_2$ ; y meseta alveolar constante (28).

Los pacientes con función pulmonar normal tienen capnogramas trapezoidales característicos y gradientes estrechos entre su  $\text{CO}_2$  alveolar (es decir,  $\text{EtCO}_2$ ) y la concentración arterial de  $\text{CO}_2$  ( $\text{PaCO}_2$ ) de 0 a 5 mmHg. El gas en el espacio muerto fisiológico explica este gradiente normal (Ilustración 45) (38). Una elevación de la línea de base indica una respiración clínicamente importante del  $\text{CO}_2$ , que puede deberse a problemas mecánicos o al uso terapéutico del espacio muerto mecánico (28).

**Ilustración 45.** Ejemplos de Ondas de Capnogramas.

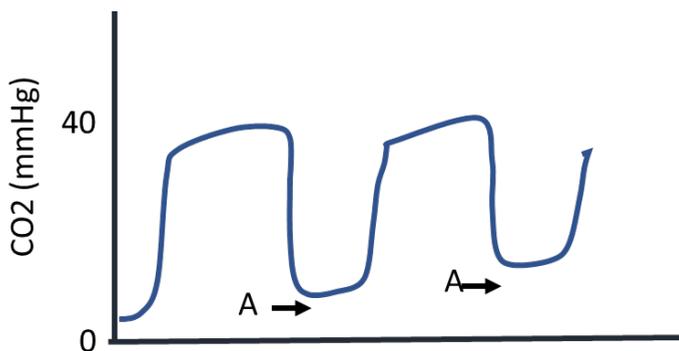


**Fuente:** Tomado de Krauss, Baruch, et al. “Carbon dioxide monitoring (capnography).” UpToDate. Retrieved from <http://www.UpToDate.com/contents/carbon-dioxide-monitoring-capnography> H14 (2016).

**Nota:** ejemplos de capnogramas recopilados durante un ciclo respiratorio de un sujeto normal, un paciente con EPOC y un paciente con ICC. Las variaciones evidentes en la morfología sugieren que las formas de onda se pueden utilizar con fines de diagnóstico.  $\text{CO}_2$ : dióxido de carbono;  $\text{PEtCO}_2$ : dióxido de carbono espiratorio final; EPOC: enfermedad pulmonar obstructiva crónica; ICC: insuficiencia cardiaca congestiva.

Los pacientes con enfermedad pulmonar obstructiva tienen un flujo espiratorio alterado y un vaciado desigual de los alvéolos debido a un desajuste entre la ventilación y la perfusión, y muestran una fase ascendente más redondeada y una pendiente ascendente en la meseta alveolar (Ilustración 46). En pacientes con función pulmonar anormal y desajuste entre ventilación y perfusión, el gradiente de  $\text{EtCO}_2$ - $\text{PaCO}_2$  se amplía dependiendo de la gravedad de la enfermedad pulmonar. El  $\text{EtCO}_2$  en pacientes con enfermedad pulmonar solo es útil para evaluar las tendencias en el estado ventilatorio a lo largo del tiempo; los valores aislados de  $\text{EtCO}_2$  pueden o no correlacionarse con la  $\text{PaCO}_2$  (38).

**Ilustración 46.** Capnograma con línea de base ascendente.



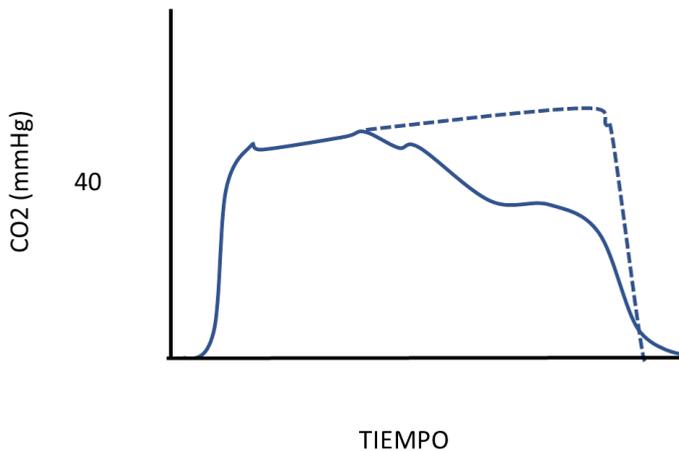
**Fuente:** Tomado de Thompson, John E., and Michael B. Jaffe. “Capnographic waveforms in the mechanically ventilated patient.” *Respiratory care* 50.1 (2005): p. 100-109.

La enfermedad crónica de los pulmones y las vías respiratorias prolonga la porción de transición del capnograma. Las unidades alveolares constantes de tiempo lento continúan mezclando gas alveolar con gas de espacio muerto. Prolongar la fase espiratoria permite que el  $\text{CO}_2$  espiratorio final ( $\text{PEtCO}_2$ ) refleje más el  $\text{PaCO}_2$ . La disminución en la diferencia de  $\text{PEtCO}_2$  a  $\text{PaCO}_2$  representa una disminución en el espacio muerto, siendo útil cuando se contrasta una respiración espontánea con la de una respiración administrada por un ventilador (28). El extremo anterior de la porción espiratoria de los

capnogramas de tiempo de sujetos con enfermedad obstructiva aumenta más lentamente que en sujetos normales con una forma descrita como aleta de tiburón y un contenido de frecuencia significativamente diferente al de un capnograma normal (42).

La incapacidad para mantener una fase de meseta puede ser indicativa de un neumotórax. La Ilustración 47 ilustra el “desvanecimiento” de la meseta alveolar (es decir, un cambio dramático en la concentración media de  $\text{CO}_2$  alveolar) (28).

**Ilustración 47.** Capnograma que Sugiere Neumotórax.

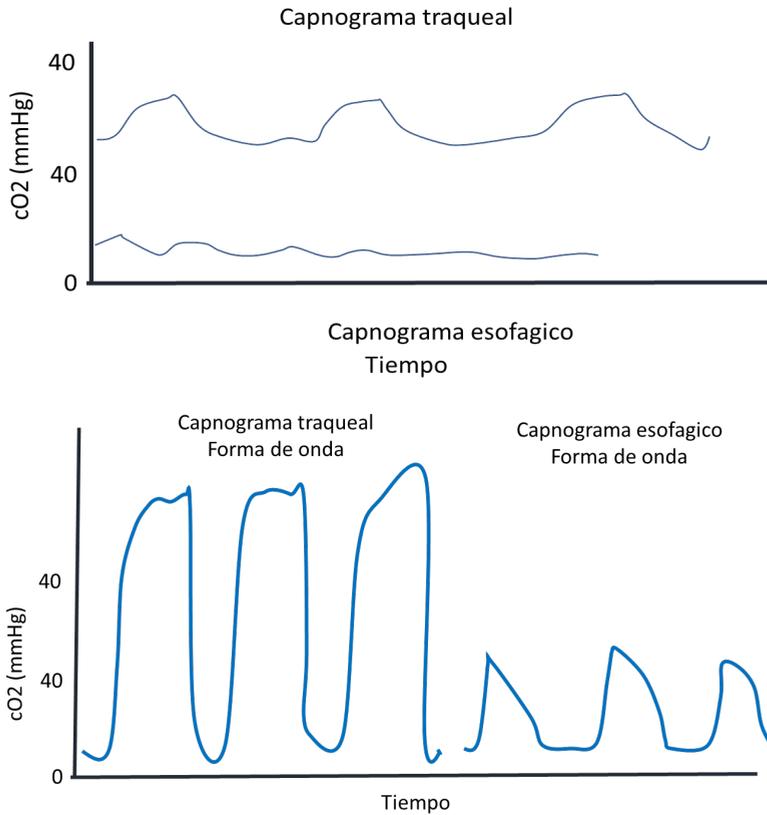


**Fuente:** Tomado de Thompson, John E., and Michael B. Jaffe. “Capnographic waveforms in the mechanically ventilated patient.” *Respiratory care* 50.1 (2005): p. 100-109.

**Nota:** Un capnograma con pérdida de la fase alveolar durante la espiración sugiere neumotórax. El área sombreada representa un capnograma normal.

Un capnograma de un tubo endotraqueal colocado esofágicamente suele tener una forma y un tamaño diferente a los de un capnograma traqueal normal. Además, las formas de onda capnográficas del esófago generalmente estarán presentes solo durante unas pocas respiraciones. La diferencia de forma entre la colocación traqueal y esofágica es claramente visible en adultos (Ilustración 48A) y neonatos (Ilustración 48B), con raras excepciones. El  $\text{CO}_2$  en el esófago, que generalmente está presente a partir del  $\text{CO}_2$  en el estómago debido al gas exhalado, se elimina en segundos. En neonatos con baja perfusión pulmonar y derivación intracardiaca, la forma de onda del capnograma puede estar disminuida en amplitud (28).

**Ilustración 48.** Capnogramas de Adultos y Neonatos con Intubación.

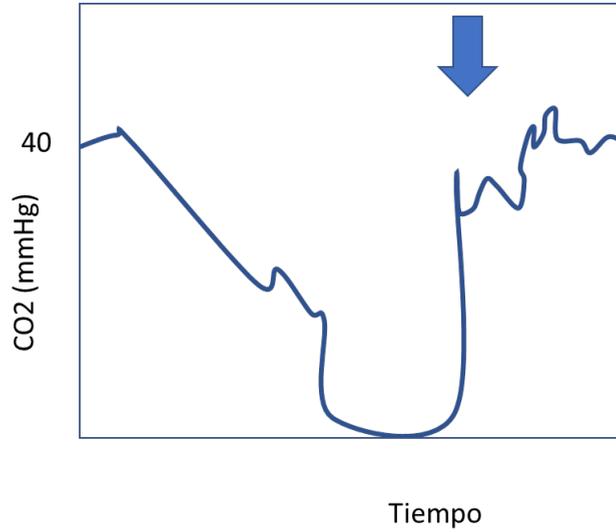


**Fuente:** Tomado de Thompson, John E., and Michael B. Jaffe. "Capnographic waveforms in the mechanically ventilated patient." *Respiratory care* 50.1 (2005): p. 100-109.

**Nota:** A. Capnogramas de adultos de intubación traqueal (arriba) y capnograma esofágico (abajo). B. Capnogramas neonatales de intubación traqueal (izquierda) e intubación esofágica (derecha).

Un problema mecánico durante la reanimación cardiopulmonar se puede reconocer rápidamente con la ayuda de un capnograma. La Ilustración 49 ilustra una situación clínica en la que el flujo a una bolsa de reanimación no autoinflable se estableció demasiado bajo, por lo que el CO<sub>2</sub> no se estaba lavando adecuadamente de la bolsa y hubo una respiración excesiva de CO<sub>2</sub>, que se identificó a través del capnograma. El flujo aumentó y el CO<sub>2</sub> volvió a la línea de base (28).

**Ilustración 49.** Capnograma Durante Parada Cardíaca con Reinhalación.

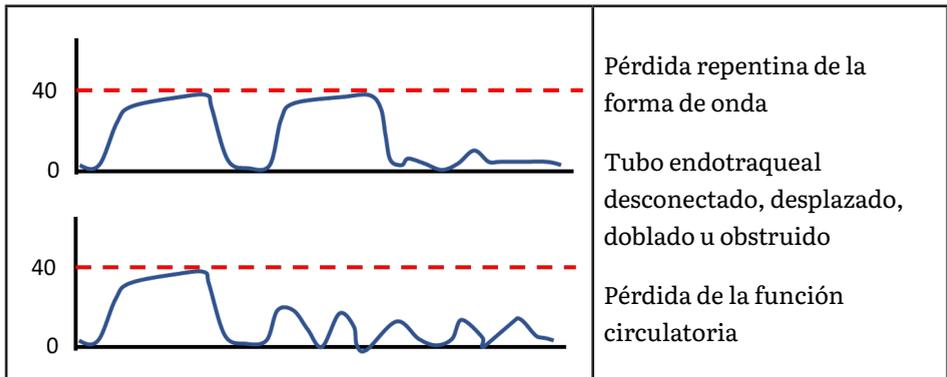


**Fuente:** Tomado de Thompson, John E., and Michael B. Jaffe. “Capnographic waveforms in the mechanically ventilated patient.” *Respiratory care* 50.1 (2005): 100-109.

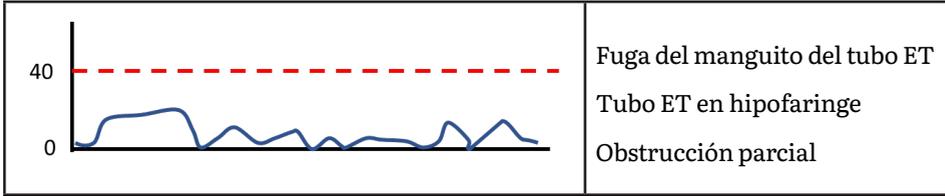
### Otras Formas de Onda

En las siguientes ilustraciones se muestra las graficas que se pueden presentar acorde a diferentes situaciones clínicas.

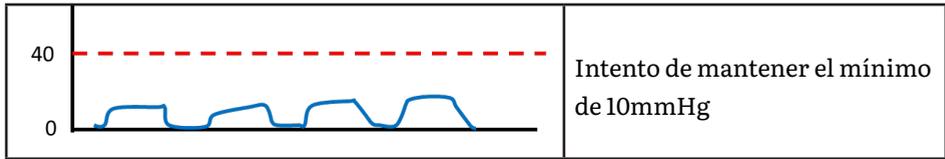
**Ilustración 50.** Formas de Onda Paciente Intubado.



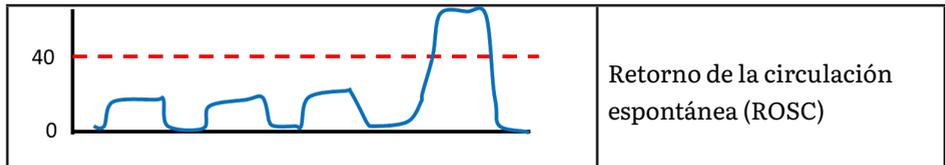
**Ilustración 51.** Onda con Disminución de EtCO<sub>2</sub>.



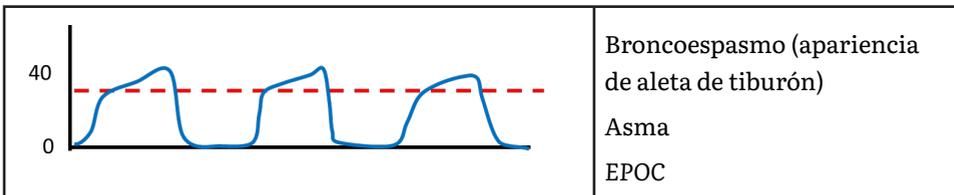
**Ilustración 52.** Evaluación de RCP.



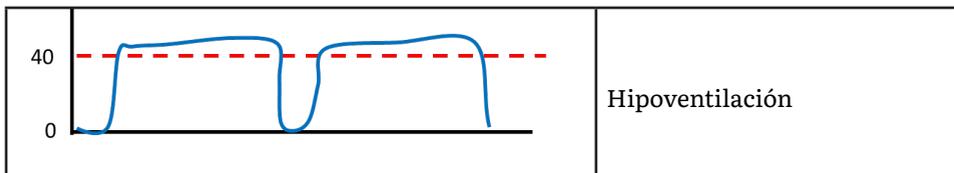
**Ilustración 53.** Aumento Repentino De EtCO<sub>2</sub>.



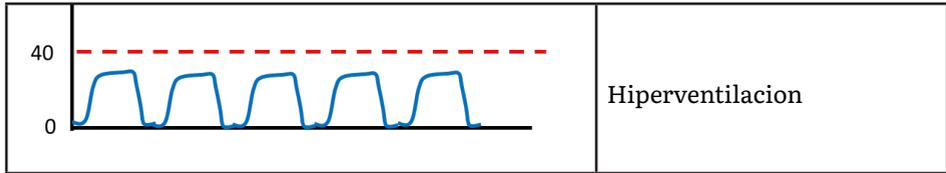
**Ilustración 54.** Capnografía en Paciente No Intubado.



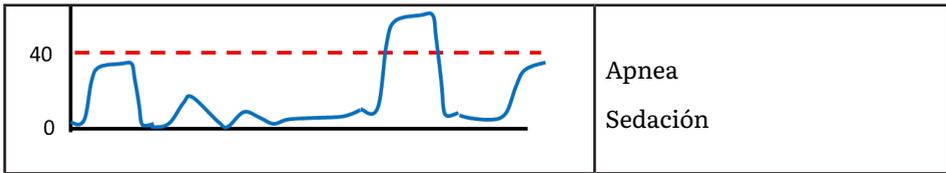
**Ilustración 55.** Hipoventilación.



**Ilustración 56.** Hiperventilación.



**Ilustración 57.** Decece EtCO<sub>2</sub>.



**Fuente:** Traducido de Long, B. “Interpreting Waveform Capnography: Pearls and Pitfalls.” EMDocs, 2016. Retrieved 09 September 2022, from <http://www.emdocs.net/interpreting-waveform-capnography-pearls-and-pitfalls/>

## Clasificación y Tipos de Monitoreo de CO<sub>2</sub> Exhalado

Un capnógrafo es un monitor que mide las concentraciones de CO<sub>2</sub> en gases respirados a lo largo del tiempo y muestra valores numéricos para PET-CO<sub>2</sub>, frecuencia respiratoria y, a veces, la concentración de CO<sub>2</sub> inspirada o la presión parcial (11). Los monitores de CO<sub>2</sub> son cuantitativos o cualitativos. Los dispositivos cuantitativos miden el CO<sub>2</sub> espiratorio final preciso (EtCO<sub>2</sub>), ya sea como un número (capnometría) o como un número y una forma de onda (capnografía) (38). Un capnógrafo tiene 2 velocidades de grabación. La velocidad rápida es de aproximadamente 12,5 mm/s, lo que permite la interpretación de los cambios a corto plazo. La velocidad lenta es de aproximadamente 25 mm/min, lo que permite identificar tendencias a largo plazo (28).

Existen dos tipos de capnógrafos según la forma que emplean para medir el CO<sub>2</sub>: de flujo principal “Corriente principal” (mainstream en inglés) y de flujo lateral “Corriente lateral” (sidestream o microstream) (43) dependiendo de si el sensor se coloca directamente en la vía de flujo de gas en las vías respiratorias o si se aspira una muestra de gas del circuito de respiración. Los dispositivos de flujo lateral utilizan un monitor de infrarrojos ubicado lejos del paciente, mientras que los dispositivos principales están limitados

a pacientes intubados, ya que el dispositivo de práctica de infrarrojos está ubicado en el conector del tubo endotraqueal (5).

En la técnica de “corriente principal”, la ventana de muestreo está en el circuito del ventilador y mide el  $\text{CO}_2$ , mientras que en la “corriente lateral”, el analizador de gases se encuentra fuera del circuito del ventilador. En ambos tipos, el analizador de gases utiliza radiación infrarroja, espectros de masas o Raman y una tecnología de espectros fotoacústicos (44).

La capnografía utiliza radiación infrarroja (IR) para realizar mediciones. Las moléculas de  $\text{CO}_2$  absorben la radiación IR a una longitud de onda muy específica (4,26  $\mu\text{m}$ ), y la cantidad de radiación absorbida tiene una relación casi exponencial con la concentración de  $\text{CO}_2$  presente en la muestra de aliento. La detección de estos cambios en los niveles de radiación IR, utilizando fotodetectores adecuados sensibles en esta región espectral, permite calcular la concentración de  $\text{CO}_2$  en la muestra de gas (38).

El capnógrafo mainstream (corriente principal) tiene un sensor incluido en el circuito ventilatorio en pacientes intubados o bien se fija a un adaptador aéreo o naso-oral en el caso de pacientes con ventilación espontánea. Dicho sensor se conecta a un monitor. En este tipo de capnógrafos, la fuente de infrarrojos y los fotodetectores están en línea, en lados opuestos del circuito principal, a través del cual pasan los rayos, o bien debajo de la nariz en pacientes no intubados. Tienen una respuesta más rápida y no precisan retirar una muestra de gas de la vía aérea (45).

Esta ubicación de medición da como resultado valores de  $\text{CO}_2$  en tiempo real dentro de las vías respiratorias y una representación gráfica en tiempo real de la forma de onda de  $\text{CO}_2$  trazada a lo largo del tiempo o por el volumen exhalado (11).

Las desventajas del monitoreo de  $\text{CO}_2$  convencional incluyen el costo del sensor; posibilidad de daños en el sensor y el cable de conexión durante la manipulación y el monitoreo del paciente; aumento del espacio muerto mecánico del circuito; potencial de ensuciamiento con secreciones tosidadas y condensado del circuito, requiriendo calibraciones de forma frecuente (11). Los sistemas convencionales están contraindicados para pacientes intubados (38).

En los capnógrafos sidestream (corriente lateral), el sensor se encuentra dentro del monitor y mide el gas respiratorio a través de una cánula nasal o nasal-oral aspirando una pequeña muestra del aliento exhalado a través

de una longitud de tubo de pequeño diámetro de pequeñas muestras de gas exhalado que son trasladadas a una cámara de medida (38).

Esto hace que exista un ligero retraso en el análisis como consecuencia del tiempo requerido para el transporte del gas (45). Los dispositivos convencionales miden  $\text{CO}_2$  directamente de las vías respiratorias, más comúnmente con el sensor alojado directamente en el circuito respiratorio, y estos dispositivos se utilizan para pacientes intubados y con respiración espontánea (7).

Los diferentes diseños de interfaz para su uso en pacientes no intubados incorporan puntos de muestreo nasales y orales para mejorar la precisión de la medición. Varios diseños de interfaz incluyen la capacidad de administrar oxígeno simultáneamente a través de un dispositivo de canal dividido (11).

Los sistemas de flujo lateral utilizan caudales altos (alrededor de 150 cc/min) o caudales bajos (alrededor de 50 cc/min). Los caudales varían según la cantidad de  $\text{CO}_2$  necesaria en la muestra de aliento para obtener una lectura precisa. Los sistemas de flujo bajo tienen una tasa de oclusión más baja (por la humedad o las secreciones del paciente) y son precisos en pacientes con volúmenes corrientes bajos (ej., recién nacidos, lactantes y pacientes adultos con hipoventilación y respiración con volumen corriente bajo). Los sistemas de flujo bajo también son resistentes a la dilución del oxígeno suplementario. Se ha demostrado que el muestreo de sistemas de alto flujo a  $\geq 100$  cc/min es impreciso en recién nacidos, lactantes, niños pequeños y en pacientes adultos con hipoventilación (38).

Un problema fundamental que presentan los capnógrafos sidestream es la condensación del agua, acumulándose el vapor de agua en la muestra del tubo y provocando ello errores en la detección correcta del  $\text{CO}_2$ . Para ello, algunas unidades contienen un adaptador especial con trampa de agua con el fin de minimizar este problema (45).

Dado que el muestreo de flujo lateral requiere un caudal de muestra aspirado continuo desde el circuito del ventilador, puede haber interferencias con la medición de los parámetros de ventilación y el mecanismo de activación. Además, cuando los sistemas sidestream se utilizan intraoperatoriamente con agentes anestésicos inhalados, se requiere un sistema de barrido para prevenir la contaminación ambiental y la exposición a los proveedores de atención médica (46).

La monitorización de  $\text{CO}_2$  lateral basada en el tiempo es el tipo más comúnmente utilizado en el entorno de la sala de operaciones, durante la moni-

torización del paciente no intubado y durante la reanimación cardiopulmonar (11).

Los dispositivos cualitativos utilizados para detectar y controlar el  $\text{CO}_2$  incluyen detectores colorimétricos, siendo la forma más simple de monitoreo. Son dispositivos en forma de discos que son sensibles al pH y la cantidad de cambio de color refleja la concentración de  $\text{CO}_2$  en el gas espirado (5). Son dispositivos portátiles, desechables, económicos y de un solo uso (11). Informan el rango en el que cae el  $\text{EtCO}_2$  (ej., 0 a 10 mmHg o  $>35$  mmHg) en oposición a un valor preciso (ej., 38 mmHg) (38).

Estos son útiles para confirmar la intubación traqueal en una situación de emergencia, estimar la cantidad de  $\text{CO}_2$  en el gas exhalado o confirmar la idoneidad de la reanimación cardiopulmonar (RCP) (5, 11). Las limitaciones de los detectores colorimétricos de  $\text{CO}_2$  incluyen lecturas de falsos positivos cuando el medio de detección está contaminado con ácido gástrico o soluciones ácidas instiladas a través de un tubo endotraqueal (11).

### **Aplicaciones Clínicas de la Capnografía**

El intercambio gaseoso es una función primordial de los pulmones, la evaluación respiratoria es de gran importancia. Los clínicos evalúan esta función por observación visual de la expansión torácica, la profundidad y la frecuencia respiratoria, el uso de músculos respiratorios accesorios y la auscultación de la calidad y cantidad de ruidos respiratorios. Información cuantitativa es obtenida determinando la distensibilidad torácica/pulmonar (cambio de volumen relacionado con el cambio de presión) y la resistencia de la vía aérea. (40)

Otras técnicas más complejas involucran la medición de volúmenes pulmonares y la capacidad con espirometría las cuales también evalúan la permeabilidad de la vía aérea y la expansión torácica, viéndose afectadas por factores como el dolor, la fatiga y el pobre entendimiento por parte del paciente y el clínico de cómo debe ser la medición real (40).

En consecuencia, la evaluación de la obstrucción de las vías respiratorias o de restricción pulmonar solo es fiable en la medida en que el paciente tenga capacidad para realizar estas pruebas de manera óptima. Quizá la prueba definitiva para determinar la ventilación adecuada es la determinación invasiva de la presión parcial de  $\text{CO}_2$  ( $\text{PaCO}_2$ ), para revisar aumentos considerables y bajos de esto como el verdadero reflejo de la eficacia ventilatoria, pero está lejos de ser ideal, ya que es invasiva e intermitente (40).

La utilidad de la capnografía depende de la comprensión de la relación entre el dióxido de carbono arterial, el dióxido de carbono alveolar y el dióxido de carbono al final de la espiración (10). La capnografía durante más de 30 años ha sido un método rutinario de monitorización de la anestesia en el quirófano, se está convirtiendo en el estándar internacional para la práctica segura de la anestesia (36), así mismo para se ha utilizado en pacientes quirúrgicos para confirmar intubación traqueal y evaluar ventilación (43).

Se ha descrito el uso de la capnografía para medir el grado de desajuste ventilación/perfusión, para medir el espacio muerto (VD), para cuantificar la obstrucción del flujo de aire en el asma y el EPOC, para diagnosticar la embolia pulmonar y distinguirla de las exacerbaciones de la EPOC, para juzgar la adecuación de las compresiones torácicas en el paro cardíaco y detectar el retorno de la circulación espontánea, para estimar los cambios en el gasto cardíaco, para predecir la capacidad de respuesta a los líquidos y para ayudar en la evaluación metabólica y las necesidades nutricionales (32).

Para su uso en reanimación cardiopulmonar, intubación para confirmar la colocación del tubo endotraqueal (ETT), reanimación de pacientes críticos con sepsis, seguimiento de la respuesta al tratamiento en pacientes con dificultad respiratoria (específicamente enfermedad pulmonar obstructiva crónica, insuficiencia cardíaca congestiva -ICC- y asma), embolia pulmonar y sedación para procedimientos (39).

El uso de capnografía y el cambio resultante en  $\text{EtCO}_2$  se han descrito como indicadores de oclusión durante el aislamiento de las venas pulmonares (PV) y de eficacia a largo plazo de éste (47). Los usos de la capnografía son muy variados y no se limitan a la monitorización de las vías respiratorias (37).

### **Capnografía como Monitoreo de la Ventilación**

La importancia clínica de la frecuencia respiratoria se encuentra bien documentada en la evidencia. Como signo vital es un detector temprano de enfermedades graves, como infección, depresión respiratoria, especialmente causada por opioides o sedantes, e insuficiencia respiratoria; existe evidencia sustancial de que una frecuencia respiratoria anormal es un predictor de eventos clínicos potencialmente graves. Sin embargo, se ha informado como el “signo vital descuidado”, probablemente porque en muchas situaciones tiene que ser monitoreado manualmente (48).

Ahora la tecnología permite el monitoreo continuo de la ventilación de forma no invasiva. A medida que esto se vuelve más disponible, la detección temprana

na del deterioro en los pacientes se vuelve posible para que se puedan realizar intervenciones tempranas, evitando eventos de “falla en el rescate” (5).

La capnometría cuantitativa tiene un gran potencial para guiar la ventilación en el ámbito prehospitalario. En teoría, la monitorización de los datos de EtCO<sub>2</sub> debería conducir a una baja incidencia de hiperventilación, independientemente de si se utiliza ventilación manual o mecánica (49). La visualización gráfica de la concentración de dióxido de carbono exhalado e inhalado en función del tiempo se utiliza para controlar la ventilación (50). Los pacientes con ventilación mecánica deben ser monitoreados con capnografía para garantizar la idoneidad de la ventilación y un seguimiento continuo (5).

La ventilación guiada por el EtCO<sub>2</sub> tiene un impacto directo al evitar la vasoconstricción cerebral refleja en respuesta a la hipocapnia, es posible también que EtCO<sub>2</sub> bajos sean un marcador sustituto de patrones de ventilación perjudiciales en los resultados del paciente. La ventilación con presión positiva provoca un aumento de la presión intratorácica media, que puede disminuir la perfusión cerebral al disminuir el retorno venoso y reducir el gasto cardíaco (49).

Además, una presión intratorácica media elevada puede transmitirse de forma retrograda a través del sistema venoso yugular, provocando un aumento paradójico de la presión Intracerebral. Además, de sus efectos sobre la hemodinámica cerebral y sistémica, la ventilación excesivamente agresiva puede ser perjudicial para el paciente crítico por la liberación de citoquinas proinflamatorias y la apoptosis de las células endoteliales pulmonares (49).

La capnografía aún carece de la sensibilidad para demostrar una disminución de la ventilación, esta tecnología es insuficiente para identificar signos tempranos de compromiso respiratorio en pacientes no intubados, no se ha utilizado universalmente para pacientes no intubados por múltiples razones, incluida la incapacidad de relacionar de manera confiable el EtCO<sub>2</sub> con el nivel de compromiso respiratorio inminente y la falta de cumplimiento del paciente, incluso cuando el paciente tolera el equipo de capnografía, proporciona un indicador rezagado del rendimiento respiratorio, en lugar de una medida directa de los cambios en los volúmenes respiratorios (51).

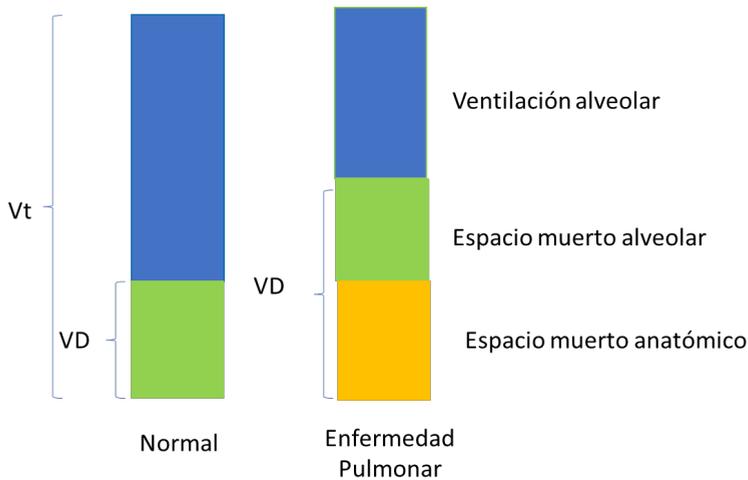
La evidencia limitada que está disponible para apoyar el uso de la capnografía proviene del entorno periprocedimental (33). Una revisión sistemática y metanálisis concluyó que la capnografía proporciona una advertencia

temprana de depresión respiratoria posoperatoria (PORD) antes de la desaturación de oxígeno, especialmente cuando se administra oxígeno suplementario, en comparación con la oximetría de pulso; las probabilidades de reconocer PORD fueron casi 6 veces mayores en el grupo de capnografía que en el de pulsioximetría (*odds ratio*: 5,83, IC 95%, 3,54-9,63;  $p < 0,00001$ ). No se examinó el impacto de la capnografía en la reducción de la activación del equipo de rescate, las transferencias a la UCI o la mortalidad (52).

El uso de la capnografía puede proporcionar mediciones precisas de  $PECO_2$  que son estimaciones aceptables de  $PCO_2$  alveolar ( $PaCO_2$ ) en sujetos normales; sin embargo, la diferencia entre el  $PECO_2$  y el  $PaCO_2$  puede ser bastante grande en pacientes con enfermedad pulmonar. Esta diferencia es un reflejo de la fracción VD de ventilación:  $VD/VT = (PaCO_2 - PECO_2) / PaCO_2$ . La VD pulmonar fisiológica es la fracción de la VT que nunca se encuentra con un alvéolo funcional. Se compone de la VD anatómica, que representa las vías respiratorias conductoras, y la VD alveolar. (33)

Las enfermedades que afectan el parénquima pulmonar o la vasculatura pulmonar pueden aumentar significativamente la cantidad de VD alveolar, ya sea reduciendo el número de alvéolos que reciben flujo sanguíneo capilar o disminuyendo el área de superficie de los alvéolos o por alguna combinación de estos mecanismos. A medida que aumenta la fracción de VD, el paciente debe aumentar concomitantemente su ventilación para compensar la reducción de la ventilación alveolar. En este escenario, el  $CO_2$  alveolar exhalado se diluye cuando se mezcla con la muy baja concentración de  $VDCO_2$ . Las fracciones más altas de VD conducen a una mayor diferencia entre  $PaCO_2$  y  $PECO_2$ . La Ilustración 58 muestra una representación de la magnitud del impacto de la fracción VD (baja  $PCO_2$ ) en pacientes hospitalizados con pulmones normales versus enfermos (33). ver ilustración 58:

**Ilustración 58.** Impacto de la fracción VD normal Versus enfermedad pulmonar.



**Fuente:** tomado de Rackley, Craig R. “Monitoring during mechanical ventilation.” *Respiratory care* 65.6 (2020): p. 832-846.

**Nota:** en un paciente normal, el volumen de espacio muerto ( $VD$ ) constituye aproximadamente el 25% del volumen corriente normal ( $VT$ ). En un paciente con enfermedad pulmonar donde la interfaz capilar alveolar está comprometida (por ejemplo, enfisema, embolia pulmonar, SDRA o neumonía), la fracción de  $VD$  puede ser superior al 50%.

El uso de la capnografía de tiempo puede parecer una alternativa atractiva al análisis de gases en sangre arterial para ajustar la ventilación mecánica porque es una herramienta de seguimiento continua y no invasiva, sin embargo, se pueden observar diferencias significativas entre  $PaCO_2$  y  $PEtCO_2$  en paciente con enfermedad pulmonar. En pacientes ventilados mecánicamente, puede asegurar la colocación adecuada del TET y proporcionar una aproximación de  $VD$  (es decir,  $VD/VT$ ). La capnografía volumétrica es una herramienta prometedora que se basa en conceptos fisiológicos, pero se necesita más investigación para definir su valor diagnóstico y su utilidad potencial para guiar las intervenciones terapéuticas, puede permitir la evaluación de la fracción  $VD$  y cambios en la ventilación (33).

Mediante el control de la concentración de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) exhalado en el transcurso de un ciclo respiratorio la capnografía volumétrica se puede utilizar para evaluar con precisión el espacio muerto de las vías respiratorias. El  $CO_2$  exhalado se representa frente al volumen exhalado y, a par-

tir de las formas de onda resultantes, pueden calcularse la presión parcial alveolar de dióxido de carbono ( $PaCO_2$ ) y la presión parcial media exhalada de dióxido de carbono y así utilizarse para determinar el espacio muerto de las vías respiratorias. En comparación con los métodos que requieren el uso de una bolsa de Douglas o calorimetría, la capnografía volumétrica es más rápida, menos engorrosa y más fácil de aplicar clínicamente (53).

### **Capnografía Durante la Intubación Traqueal**

La monitorización de  $EtCO_2$  es el método estándar de oro para la confirmación de la colocación del tubo endotraqueal (TET) y debe usarse de forma rutinaria para detectar la intubación traqueal correcta, y tiene alta sensibilidad y especificidad (54).

Sin embargo, puede no ser confiable bajo ciertas condiciones, por ejemplo, intubación endobronquial, perfusión circulatoria deficiente como en un paro cardíaco, hipotensión severa, embolia pulmonar, broncoespasmo grave, reserva pulmonar deficiente como derrame pleural, neumotórax y malignidad pulmonar (55).

La capnografía se puede utilizar para detectar tubos traqueales y tubos de traqueotomía desplazados y para diagnosticar la intubación esofágica inadvertida (37).

Un estudio multicéntrico encontró que el dispositivo colorimétrico  $EtCO_2$  es altamente preciso para confirmar la posición del tubo endotraqueal en pacientes sin paro cardiopulmonar. En pacientes con paro cardíaco, una lectura que signifique más del 0,5% de  $EtCO_2$  confirma la colocación correcta del tubo endotraqueal, mientras que un valor que signifique menos del 0,5% de  $EtCO_2$  durante la reanimación sugiere que algo anda mal (ej., intubación esofágica, flujo circulatorio inadecuado, intervalo prolongado de tiempo de inactividad), hipotermia o desajuste significativo de ventilación/perfusión) (56).

Después de la intubación, un trazo capnográfico plano indica problemas adicionales en las vías respiratorias, como que el circuito de respiración está desconectado, las vías respiratorias están torcidas o bloqueadas con secreciones, o el paciente ha mordido y ocluido el tubo (36).

El  $EtCO_2$  colorimétrico es una herramienta segura, confiable, simple y portátil para determinar la correcta colocación del tubo endotraqueal en pacientes con hemodinámica estable y es muy útil cuando no se dispone de un capnógrafo. Sin embargo, cuando los pacientes tienen una bolsa o máscara

de ventilación o consumen bebidas carbonatadas o antiácidos puede causar un resultado falso positivo, pero generalmente indica el resultado verdadero después de 6 respiraciones (44).

La capnografía es el estándar de oro para confirmar la colocación del tubo endotraqueal en condiciones de emergencia en el ámbito prehospitalario, con alta sensibilidad y especificidad (57). Sin embargo, puede no ser confiable bajo ciertas condiciones, por ejemplo, intubación endobronquial, perfusión circulatoria deficiente como en un paro cardíaco, hipotensión severa, embolia pulmonar, broncoespasmo grave, reserva pulmonar deficiente como derrame pleural, neumotórax y malignidad pulmonar (55).

Debe realizarse una monitorización capnográfica ininterrumpida durante la inducción de la anestesia, la inserción de las vías respiratorias, el mantenimiento de la anestesia, durante cualquier transferencia y durante la salida de la anestesia. Esto incluye hasta que se extraiga un tubo traqueal o una vía aérea supraglótica (54).

Las pautas de los miembros de la Difficult Airway Society basados en opinión de expertos brindan una estrategia para manejar la dificultad imprevisible con la intubación traqueal, la capnografía se puede usar para confirmar la ventilación del dispositivo de la vía aérea, como la colocación de un TET o una cricotiroidotomía, traqueotomía o un dispositivo supraglótico para la vía aérea (58).

La capnografía también puede evaluar la eficacia de la ventilación con mascarilla. Por lo tanto, puede ayudar al personal médico de primera línea a identificar a los pacientes con alto riesgo de ventilación difícil con máscara para que puedan consultar a un especialista de inmediato. La capnografía mejora la seguridad de la traqueotomía percutánea al confirmar la colocación (36).

Después de establecer la vía aérea quirúrgica, valores anormales de EtCO<sub>2</sub> durante el transporte pueden indicar qué circuito está desconectado u obstruido o si un tubo está desplazado. En pacientes con vía aérea difícil la detección temprana del desprendimiento de la vía aérea es vital (36).

### **Capnografía Durante la Sedación para Procedimientos**

La sedación de procedimiento es un método establecido para mantener la comodidad del paciente durante las intervenciones de atención médica que no requieren anestesia general. La sedación pone a los pacientes en mayor

riesgo de problemas de ventilación, lo que puede resultar en un compromiso respiratorio. Los procedimientos más comunes que utilizan sedación de procedimiento son los de gastroenterología. Cambridge University Hospitals NHS Foundation Trust (CUH) identificó como un punto de acción para la calidad de la atención la reducción de los eventos adversos relacionados con la sedación; la evidencia ha indicado que la capnografía se ha asociado con una incidencia reducida de eventos relacionados con el compromiso respiratorio durante la sedación para procedimientos (59).

Por ejemplo, en la evaluación prospectiva realizada en un hospital docente del Reino Unido en el que se evaluó el impacto de la capnografía en la seguridad del paciente dentro de cuatro servicios especializados: broncoscopia, endoscopia, cardiología y radiología intervencionistas; después de la implementación de la capnografía se observó una reducción significativa (43,2 %,  $p \leq 0,05$ ) de los eventos adversos: 147 eventos adversos ocurrieron durante 666 procedimientos sin capnografía en comparación con 93 eventos adversos que ocurrieron durante 735 procedimientos con capnografía. Concluyéndose que estos resultados sugieren una mayor seguridad del paciente después de la implementación de la capnografía (59).

Un ensayo controlado y aleatorizado en adultos que se sometieron a sedación con propofol en el servicio de urgencias con monitorización estándar (pulsioximetría, presión arterial y cardíaca) y capnografía detectó entre los 132 sujetos evaluados que la capnografía identificó todos los casos de hipoxia antes del inicio (sensibilidad 100%; especificidad 64%), concluyéndose que la adición de capnografía al monitoreo estándar para la sedación con propofol en la atención de emergencia de adultos redujo y mejoró la detección temprana de eventos hipóxicos (60).

Otro estudio aleatorizado en el que inscribieron un total de 760 pacientes el análisis por intención de tratar reveló una reducción significativa de la incidencia de desaturación de oxígeno en el brazo de capnografía en comparación con el brazo estándar (38,9% frente a 53,2%;  $P < 0,001$ ), concluyéndose que la monitorización capnográfica adicional de la actividad ventilatoria reduce la incidencia de desaturación de oxígeno e hipoxemia durante la sedación con propofol (61).

Una revisión sistemática de la literatura y metanálisis de efectos aleatorios de ensayos controlados aleatorios (ECA) informaron que la adición de capnografía a la evaluación visual y la oximetría de pulso se asoció con una reducción significativa de la desaturación leve (riesgo relativo [RR] 0,77, IC del

95 %: 0,67 a 0,89) y grave (RR 0,59, IC del 95 %: 0,43 a 0,81), así como en el uso de ventilación asistida (OR 0,47, IC 95% 0,23 a 0,95). Concluyendo que el uso de capnografía se asoció con una desaturación de oxígeno menos leve y severa, lo que puede haber ayudado a evitar la necesidad de ventilación asistida, el metanálisis mostró una reducción del compromiso respiratorio (de insuficiencia respiratoria a falla) durante la sedación y analgesia de procedimiento con la inclusión de la monitorización con capnografía (62).

La Sociedad Estadounidense de Anestesiólogos (ASA, por sus siglas en inglés) modificó sus Estándares para el control anestésico básico incluyendo el control obligatorio del dióxido de carbono ( $\text{EtCO}_2$ ) espirado al final de la espiración durante la sedación tanto moderada como profunda (63).

La Sociedad Europea de Anestesiología (ESA) y el Consejo Europeo de Anestesiología recomienda con un nivel de evidencia A y grado de recomendación fuerte utilizar en todos los pacientes sometidos a sedación procedural la capnografía para facilitar la detección temprana de problemas ventilatorios (64).

La Asociación de Anestesiólogos de Gran Bretaña e Irlanda recomienda que para la sedación de procedimiento se requiere un control mínimo de electrocardiograma,  $\text{SpO}_2$  y presión arterial no invasiva. La capnografía se debe usar durante la sedación para procedimientos siempre que haya pérdida de respuesta al contacto verbal (54).

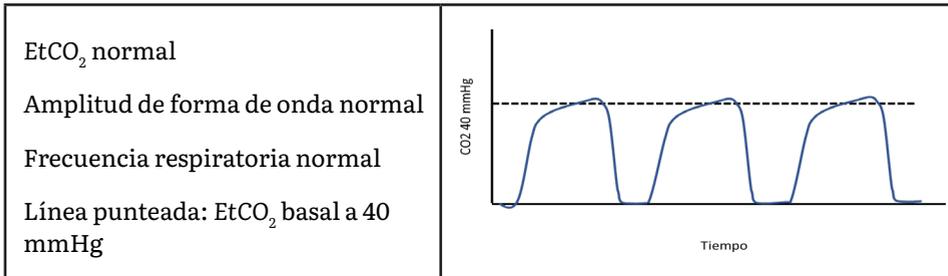
Además de la monitorización continua mediante observación visual, presión arterial no invasiva, electrocardiograma y oximetría de pulso se debe utilizar la capnografía para la evaluación continua de la ventilación, dado que monitoriza la concentración de dióxido de carbono al final de la espiración, que en teoría es más sensible a la hipoventilación alveolar que la  $\text{SpO}_2$ , (64). Sin embargo, si el paciente tiene una hipoventilación severa, el capnograma puede mostrar un número bajo durante varias respiraciones, ya que solo se puede exhalar aire del “espacio muerto” hasta que se produzca una respiración profunda y muestre un valor alto (5).

La evidencia ha demostrado que la capnografía proporciona indicaciones más tempranas de apnea que la oximetría de pulso (65, 66). Un metanálisis realizado en 2011 con el objetivo de determinar si la capnografía, además del monitoreo estándar, identifica más complicaciones respiratorias que el monitoreo estándar solo, determinó que durante la sedación y analgesia de procedimiento (PSA) los casos de depresión respiratoria tenían 17,6 veces más

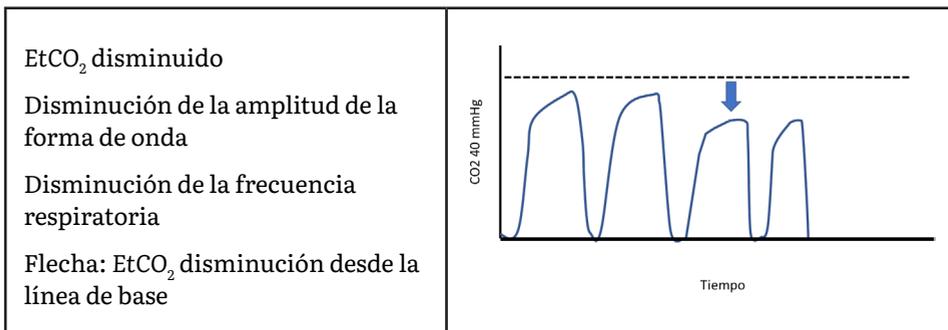
probabilidades de ser detectados si se controlaban con capnografía en comparación con la monitorización estándar (IC del 95 %, 2,5-122,1;  $P < 0,004$ ), concluyéndose que la monitorización del dióxido de carbono al final de la espiración es una adición importante para detectar la depresión respiratoria durante el PSA (67).

La capnografía en los pacientes que se espera que reciban una sedación moderada o profunda proporciona la forma de onda de ventilación, la frecuencia respiratoria y el  $\text{EtCO}_2$ , que se utilizan para predecir la hiperventilación por analgesia inadecuada, así como la hipoventilación por exceso de sedación (Ilustración 59). La capnografía ayuda al especialista a valorar los medicamentos para los pacientes, especialmente los adultos mayores, brinda señales de advertencia tempranas de eventos respiratorios adversos durante los procedimientos y mejora la atención al paciente (36). También se recomienda para ayudar a monitorear la permeabilidad de las vías respiratorias, la frecuencia y el patrón respiratorio (54). Ver ilustraciones 59 a 63.

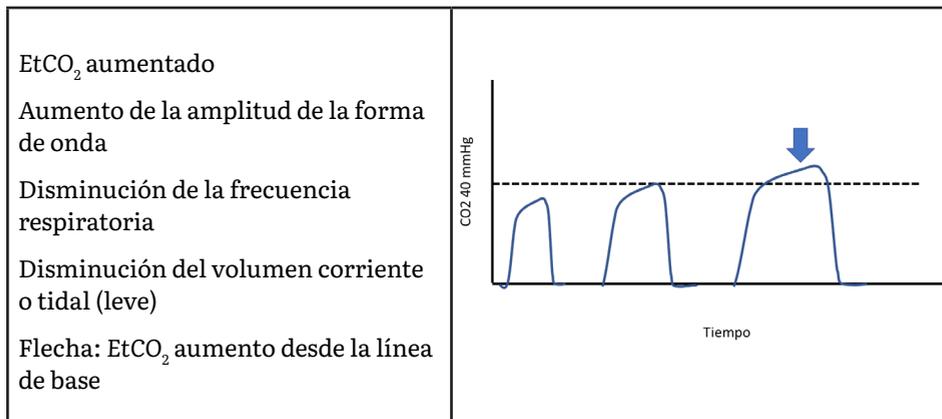
**Ilustración 59.**  $\text{EtCO}_2$  Normal Durante La Sedación Procedimental Normal.



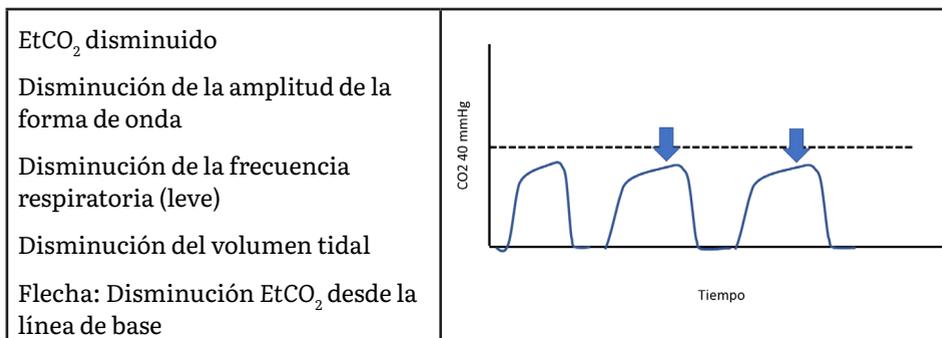
**Ilustración 60.** Hiperventilación.



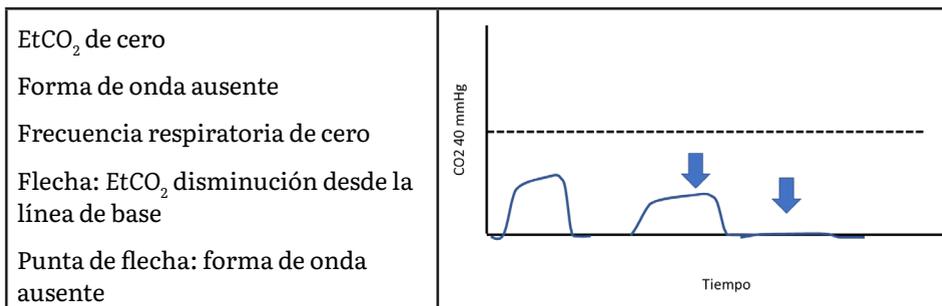
**Ilustración 61.** Hipoventilación bradipneica.



**Ilustración 62.** Hipoventilación hipoapneica.



**Ilustración 63.** Hipoventilación y apnea.



**Fuente:** Traducido de Huang, C. H., & Wei, K. H. “Applications of Capnography in Airway Management Outside the Operating Room.” *Signa Vitae*, vol. 17, no. 4, 2021, p. 18-24.

## Capnografía Durante la Reanimación Cardiopulmonar

El dióxido de carbono al final de la espiración ( $\text{EtCO}_2$ ) es la presión parcial de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en los gases respiratorios al finalizar una respiración exhalada. Este valor refleja tanto el gasto cardíaco (GC) como el flujo sanguíneo pulmonar, y es un indicador indirecto de la presión de perfusión coronaria, ya que el  $\text{CO}_2$  es transportado por el sistema venoso hacia el lado derecho del corazón antes de ser bombeado hacia los pulmones por el ventrículo derecho. Los niveles bajos de  $\text{EtCO}_2$  se observan comúnmente durante un paro cardíaco, lo que refleja el gasto cardíaco comparativamente bajo proporcionado por la reanimación cardiopulmonar (RCP) (68).

La calidad de la reanimación cardiopulmonar (RCP) depende de muchos componentes, como el manejo de las vías respiratorias, la profundidad de compresión y el retroceso torácico, el tiempo de no intervención y la desfibrilación temprana. La forma más común de controlar los esfuerzos de reanimación es el monitoreo del dióxido de carbono al final de la de la espiración. El dióxido de carbono al final de la espiración se correlaciona altamente con el gasto cardíaco, el flujo sanguíneo miocárdico, la presión diastólica aórtica, la presión de perfusión coronaria, el índice cardíaco y la presión de perfusión cerebral (3).

Los datos sobre la oxigenación y la ventilación durante el manejo de las vías respiratorias mediante RCP han revelado resultados nocivos en pacientes con hiperoxia o hipoxia e hipercapnia o hipocapnia. La capnografía podría ser una forma eficaz de controlar la tasa de ventilación durante la RCP previniendo la hiperventilación y, por tanto, la tendencia a la hipocapnia o hiperoxia (69).

El manejo de las vías respiratorias y la ventilación son componentes esenciales de la reanimación cardiopulmonar para lograr el suministro de oxígeno a fin de prevenir lesiones hipóxicas y aumentar las posibilidades de supervivencia (70).

En la reanimación prehospitalaria la capnografía de forma de onda tiene un papel importante en varios aspectos. En primer lugar, representa el estándar de oro para confirmar la posición correcta del tubo y en segundo lugar, se puede utilizar para controlar la calidad de las compresiones torácicas, la detección de retorno de la circulación espontánea (ROSC), el control de la frecuencia de ventilación y el pronóstico. Además, dado que algunas causas de paro cardíaco conducen a un  $\text{CO}_2$  al final de la espiración más bajo o

alto de lo esperado, puede usarse para el diagnóstico diferencial. Después de ROSC la ventilación se puede ajustar de acuerdo con el CO<sub>2</sub> al final de la espiración (70).

Las Directrices de la American Heart Association (AHA) del 2020 para reanimación cardiopulmonar (RCP) y atención cardiovascular de emergencia (ACE) mencionan que puede ser razonable utilizar parámetros fisiológicos como el ETCO<sub>2</sub> y la onda de capnografía, cuando sea posible, para monitorear y optimizar la calidad de RCP, guiar el tratamiento con vasopresores y detectar el retorno de la circulación espontánea (RCE) (71).

La revisión sistemática realizada por Cereceda-Sánchez, et al (2019) ha demostrado que la capnografía facilita la práctica clínica avanzada de la ventilación con mascarilla en la reanimación cardiopulmonar, tras el análisis de la evidencia recolectada (cuatro ensayos clínicos aleatorizados y trece estudios observacionales) recomiendan un nivel capnográfico de C en adultos y B en recién nacidos (72).

Algunos resultados de los estudios publicados indican que la capnografía tiene el potencial de facilitar la práctica clínica avanzada de ventilación con dispositivos de vía aérea supraglótica durante la reanimación cardiopulmonar, sin embargo, la evidencia hasta el momento es escasa, en su mayoría de estudios observacionales con alto riesgo de sesgo, no se ha publicado ninguna revisión específica sobre el uso de dispositivos supraglóticos con monitorización capnográfica durante la RCP; conllevando a no establecer un grado de recomendación (69).

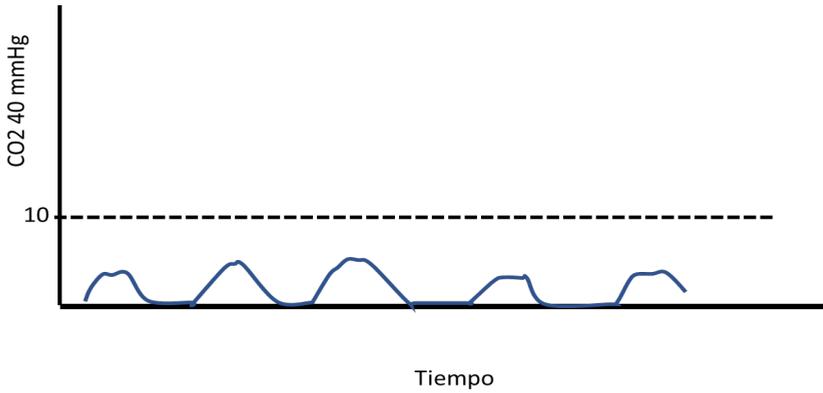
EtCO<sub>2</sub> se convierte en un indicador en tiempo real para evaluar la efectividad de las compresiones cardíacas al reflejar el flujo sanguíneo pulmonar. Se logran compresiones torácicas de alta calidad cuando EtCO<sub>2</sub> es de 10 a 20 mmHg. Además, un aumento abrupto de EtCO<sub>2</sub> (35–45 mmHg) puede indicar el retorno de la circulación espontánea (Ilustración 64) (36).

Las Directrices del Consejo Europeo de Reanimación 2021 recomiendan la capnografía de forma de onda durante el soporte vital avanzado en las siguientes circunstancias: **i)** para confirmar la colocación correcta del tubo traqueal durante la RCP. **ii)** para controlar la calidad de la RCP. **iii)** Un aumento de EtCO<sub>2</sub> durante la RCP puede indicar que se ha producido retorno de la circulación espontánea (ROSC). Sin embargo, la compresión torácica no debe interrumpirse basándose solo en este signo. Aunque los valores altos y crecientes de EtCO<sub>2</sub> se asocian con mayores tasas de ROSC y supervivencia

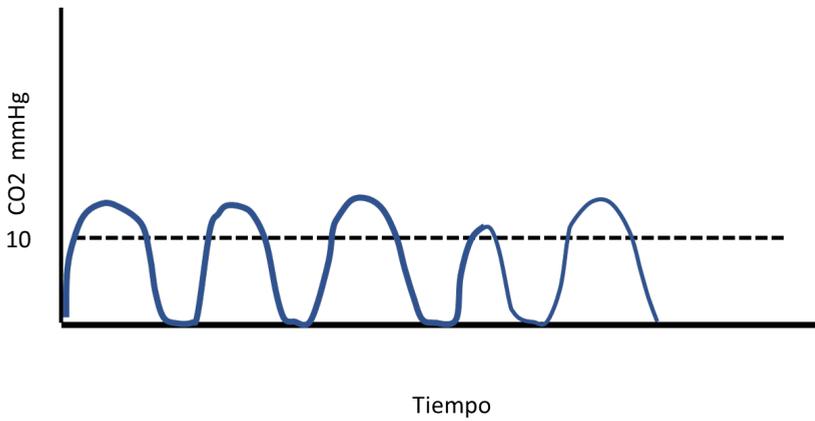
después de la RCP, no usar el valor bajo de EtCO<sub>2</sub> solo para decidir si se debe detener un intento de reanimación (73).

**Ilustración 64.** Valoración Capnográfica Durante la Reanimación Cardiopulmonar.

Compresión torácica EtCO<sub>2</sub> ineficaz <10 mmHg durante la RCP - Línea punteada:  
EtCO<sub>2</sub> basal a 10 mmHg

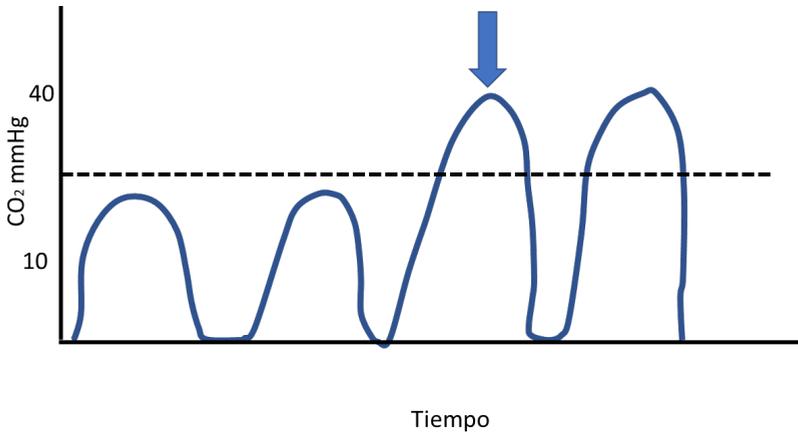


Compresión torácica efectiva EtCO<sub>2</sub> >10 mmHg durante la RCP



Un incremento abrupto de EtCO<sub>2</sub> puede indicar un retorno de la circulación espontánea.

Flecha: un aumento abrupto de EtCO<sub>2</sub> superior a 10–15 mmHg



**Fuente:** Traducido de Huang, C. H., & Wei, K. H. “Applications of Capnography in Airway Management Outside the Operating Room.” *Signa Vitae*, vol. 17, no. 4, 2021, pp. 18-24.

### Capnografía Durante el Paro Cardíaco

El paro cardíaco extrahospitalario continúa siendo una condición devastadora a pesar de los avances en el cuidado de la reanimación. Asegurar un intercambio de gases eficaz debe sopesarse frente al impacto negativo que la hiperventilación puede tener en la fisiología cardíaca y la supervivencia (74).

La ventilación puede desempeñar un papel crucial en la reanimación de un paro cardíaco al permitir la administración adecuada de oxígeno y la eliminación significativa de dióxido de carbono, mejorando así el metabolismo celular. Los factores modificables que afectan la ventilación extrahospitalaria incluyen la frecuencia, el volumen tidal, el tiempo de administración de la ventilación, la presión en las vías respiratorias y el momento de las compresiones torácicas (74).

En parada cardíaca extrahospitalaria prolongada, los niveles de EtCO<sub>2</sub> <10 mmHg se asocian consistentemente con un mal resultado, mientras que los niveles por encima de este umbral se han sugerido como un criterio para considerar a los pacientes para reanimación extracorpórea de rescate. Los

niveles iniciales de  $\text{EtCO}_2 >10 \text{ mmHg}$  se correlacionan con un aumento de ROSC y supervivencia al ingreso hospitalario, estudios han demostrado que la supervivencia de un paro cardíaco depende de la provisión de una perfusión adecuada a los órganos vitales (75).

Las directrices de la American Heart Association para la reanimación cardiopulmonar y la atención cardiovascular de emergencia de 2010 sugirió 1) un monitor de  $\text{CO}_2$  exhalado sin forma de onda, además de la evaluación clínica, como el método inicial para confirmar la colocación correcta del tubo en un paciente con paro cardíaco si la capnografía de forma de onda no está disponible. 2) Se sugiere la capnografía cuantitativa en forma de onda en pacientes intubados para monitorear la calidad cardiopulmonar, optimizar las compresiones torácicas y detectar el retorno de la circulación espontánea durante las compresiones torácicas o cuando la verificación del ritmo revela un ritmo organizado (76).

La capnografía tiene muchas aplicaciones diferentes en el manejo de la reanimación por paro cardíaco fuera del hospital, incluida la confirmación del tubo endotraqueal, la evaluación del desalojo del tubo endotraqueal, la garantía de la calidad de las compresiones torácicas, la detección del retorno de la circulación espontánea, la ayuda en la terminación de las decisiones de reanimación y la optimización ventilación (74). Al identificar a la capnografía como herramienta de monitorización útil durante la reanimación, las directrices actuales para el soporte vital avanzado recomiendan no utilizar los valores de  $\text{EtCO}_2$  de forma aislada para la toma de decisiones en el manejo de un paro cardíaco (75).

La capnografía de forma de onda permite monitorear la tasa de ventilación durante la RCP; sin embargo, la interferencia de los artefactos de compresión torácica puede degradar la detección de ventilación y causar falsas alarmas de hiperventilación (75). Las lecturas de  $\text{EtCO}_2$  también se ven afectadas por los cambios en la ventilación por minuto, las compresiones torácicas, la etiología del paro cardíaco (ej., paro no presenciado, embolia pulmonar, paro precipitado por asfixia), la duración del paro cardíaco y la administración de medicamentos en bolo (ej., bicarbonato de sodio y epinefrina) (74). El uso del análisis automatizado del capnograma puede reducir el error de medición de la tasa de ventilación a  $1,8 \text{ respiraciones} \cdot \text{min}^{-1}$  y la precisión de las alarmas de ventilación a  $>99\%$  (75).

Los volúmenes corrientes generados por la compresión torácica (que dependen de la permeabilidad de las vías respiratorias intratorácicas, la fisiología

del paciente y el error del equipo) pueden causar artefactos (es decir, oscilaciones) en las formas de onda de EtCO<sub>2</sub> lo que puede dificultar la interpretación precisa de la calidad de la RCP y la ventilación. Una estrategia para ayudar con la interpretación de las formas de onda de EtCO<sub>2</sub> con oscilaciones es usar el EtCO<sub>2</sub> máximo registrado entre ventilaciones ininterrumpidas, ya que esto probablemente refleja el CO<sub>2</sub> alveolar preciso (74).

Dado que se espera que EtCO<sub>2</sub> refleje la perfusión de los órganos durante la RCP, no solo puede representar un objetivo de reanimación, sino también un predictor que indica cuándo la RCP prolongada es inútil. Se ha investigado como predictor de ROSC en etapas más tempranas de la reanimación, cuando podría ser incluso clínicamente más útil, pero la evidencia muestra que en este caso su precisión es generalmente menor (75).

En general, los valores de EtCO<sub>2</sub> tienden a disminuir durante la RCP en pacientes en los que la reanimación no tiene éxito, mientras que tienden a aumentar en aquellos que logran ROSC, lo que probablemente refleja una mejora progresiva en la perfusión tisular y el retorno venoso. Sin embargo, la mayoría de los estudios sobre el valor predictivo de EtCO<sub>2</sub> tienen limitaciones importantes, que incluyen la falta de análisis de potencia, cegamiento, ventilación no controlada durante la RCP y tiempos inconsistentes o indefinidos de medición de EtCO<sub>2</sub>, se necesitan estudios bien diseñados para identificar mejor los tiempos de medición óptimos y los valores de corte para el pronóstico usando este indicador (75).

El síndrome posparada cardiaca es un tema complejo y crítico en pacientes reanimados que han sufrido una parada cardiaca. La lesión por isquemia-reperusión ocurre en múltiples órganos debido al retorno de la circulación espontánea. Se requiere un conjunto de prácticas de gestión para la atención posterior a un paro cardiaco. Los monitoreos incluyen electrocardiograma, oximetría, capnografía y electroencefalografía (EEG) junto con la presión arterial, la temperatura y los signos vitales (77).

### **Monitorización continua durante el transporte de pacientes**

La capnografía proporciona al menos dos ventajas durante el transporte intrahospitalario (TIH) de pacientes en estado crítico. Primero, la extubación no planificada de un tubo endotraqueal (TET) puede ocurrir durante el TIH, y la ayuda en la detección temprana del desalojo del TET. La monitorización del CO<sub>2</sub> es el método más fiable para detectar el desprendimiento de un TET o tubo de traqueotomía durante la anestesia. Segundo, la capnografía

puede ser una estimación no invasiva del gasto cardíaco. Una disminución repentina de  $\text{EtCO}_2$  que retiene una forma de onda cuadrada puede sugerir una disminución repentina en la perfusión pulmonar causada por una obstrucción del flujo sanguíneo pulmonar, como un trombo, aire o grasa, o por un gasto cardíaco reducido. La capnografía proporciona información adicional en condiciones hemodinámicas tan inestables como el THI (36).

### **Capnografía en la Unidad de Cuidados Intensivos**

Las mediciones y cálculos derivados en la capnografía están influenciados por los cambios tanto en la ventilación como en la perfusión y, por lo tanto, son útiles para evaluar la función respiratoria y cardiovascular (78).

La capnografía tiene amplias aplicaciones en el manejo respiratorio en la unidad de cuidados intensivos, como la exhalación de  $\text{CO}_2$  requiere perfusión a los alvéolos, la capnografía se puede utilizar como una medición indirecta del flujo sanguíneo pulmonar (QP), y en pacientes con fisiología cardíaca normal, puede ser una evaluación indirecta del gasto cardíaco (GC). El volumen de eliminación de  $\text{CO}_2$  ( $\text{VCO}_2$ ) es el volumen de dióxido de carbono eliminado por cada respiración. Se obtiene mediante el análisis de la capnografía volumétrica y se mide en ml/min. Por lo tanto, el  $\text{VCO}_2$  depende de la producción de  $\text{CO}_2$  del paciente, el flujo sanguíneo pulmonar y la ventilación por minuto. Con una ventilación minuto y un estado metabólico estables, el  $\text{VCO}_2$  se convierte en un indicador indirecto del QP y, por extensión, del GC en pacientes con fisiología cardíaca normal (79).

Se ha utilizado para monitorear la ventilación fisiológica del espacio muerto y sirve como guía para optimizar el intercambio de gases durante la ventilación mecánica (79). La ventilación mecánica es un modo de apoyo comúnmente requerido durante la anestesia general o en la UCI. Desafortunadamente,  $\text{SpO}_2$  no proporciona la información necesaria sobre la ventilación y la eliminación de  $\text{CO}_2$ . Esto es importante porque la mala ventilación y la hipercarbia pueden conducir a acidosis respiratoria y colapso cardiovascular que puede no detectarse con oximetría de pulso hasta muy tarde en la oxigenoterapia suplementaria (33).

El estudio prospectivo realizado por el Royal College of Anesthetists y la Difficult Airway Society, investigó las principales complicaciones del manejo de las vías respiratorias en el Reino Unido bajo el cual recomendó la monitorización continua con capnografía en todos los pacientes con una vía aérea artificial (37).

Los estudios realizados durante las últimas décadas han demostrado con claridad que la capnografía puede proporcionar información pronóstica importante en pacientes con síndrome de dificultad respiratoria aguda y que la  $PtCO_2$  al final de la espiración no debe utilizarse para estimar o incluso para controlar la dirección del cambio en la  $PaCO_2$  en pacientes de la unidad de cuidados intensivos con ventilación mecánica. La evidencia más prometedora se relaciona con su uso en la medición no invasiva del gasto cardíaco y la optimización del reclutamiento alveolar en pacientes con síndrome de dificultad respiratoria aguda con ventilación mecánica (78).

Durante muchos años, la reanimación con volumen intravascular en pacientes con signos de perfusión inadecuada de órganos y tejidos se basó, en una buena parte en las mediciones de la presión venosa central o la presión de enclavamiento de la arteria pulmonar. Más recientemente, ha quedado claro que estas mediciones dicen poco sobre la “capacidad de respuesta al volumen”. La respuesta al volumen se evalúa con mayor precisión midiendo el gasto cardíaco antes y después de una prueba de volumen o una maniobra de elevación pasiva de la pierna (PLR), esto se puede hacer con un catéter en la arteria pulmonar o, más comúnmente, usando una de varias técnicas cuantitativas mínimamente invasivas o no invasivas, incluida la capnografía (78).

Se ha utilizado el método de Fick diferencial en el desarrollo de técnicas de nueva generación para la monitorización continua no invasiva del gasto cardíaco a partir de la medición de la eliminación de dióxido de carbono en pacientes ventilados (80).

En Fick diferencial, las estimaciones concurrentes no invasivas de contenido de oxígeno en el extremo capilar pulmonar ( $CcCO_2$ ) y  $VCO_2$  se realizan en dos puntos de tiempo independientes, que se diferencian por una pequeña variación en la ventilación alveolar. La primera medición se realiza en una fase de estado estable, después de lo cual se introduce un cambio repentino en el  $CO_2$  alveolar y se realiza un segundo registro. Siempre que la variación transitoria en la eliminación de  $CO_2$  sea de magnitud óptima,  $CvCO_2$  se puede considerar como constante durante el cambio en la ventilación (81).

Esto permite la estimación del flujo sanguíneo pulmonar que participa en el intercambio de gases, conocido como flujo sanguíneo pulmonar efectivo (EPBF), sin necesidad de un análisis invasivo de gases en sangre. La mayoría de los métodos de monitorización del gasto cardíaco basados en  $CO_2$  se basan en este principio, la diferencia entre los enfoques radica principalmente

en cómo se induce el cambio en la ventilación. En el método capnodinámico actual, el cambio es generado por variaciones rítmicas en la relación de inspiración a espiración (I:E). Las variaciones en esta inducen cambios en la concentración y eliminación de  $\text{CO}_2$  alveolar, relacionados con el flujo sanguíneo alveolar (81).

La extensa validación preclínica en modelos animales de inestabilidad hemodinámica, con sondas de flujo ultrasónico implantadas para mediciones de referencia estándar de oro, muestra que este enfoque ofrece una medición confiable y continua del gasto cardíaco en tiempo real. El progreso en el desarrollo de estas tecnologías sugiere que un método sólido, automatizado, confiable de monitoreo no invasivo del gasto cardíaco y está al alcance de la mano para su uso en cuidados intensivos. La gran ventaja de este enfoque es que puede integrarse completamente la máquina de anestesia y el ventilador, utilizando componentes que ya son estándar en las unidades de cuidados intensivos y debe ser prácticamente automático (80).

Las ventajas de la técnica de respiración parcial de  $\text{CO}_2$  son que no es invasiva y puede proporcionar mediciones casi continuas del gasto cardíaco. Las desventajas son que solo se puede usar en pacientes intubados y con ventilación mecánica y que se basa en muchas suposiciones. Específicamente, la precisión de la técnica depende de 1) qué tan cerca  $P_{\text{etCO}_2}$  se aproxima a  $P_{\text{aCO}_2}$ , 2) qué tan cerca  $\text{SpO}_2$  se aproxima a la verdadera saturación de hemoglobina arterial, 3) si  $\text{CaCO}_2$  y  $\text{PaO}_2$  se pueden calcular con precisión a partir del  $\text{CO}_2$  predicho y las curvas de disociación  $\text{O}_2$ , y 4) si  $\text{Q}'\text{S}/\text{Q}'\text{T}$  puede determinarse con precisión únicamente sobre la base de  $\text{FiO}_2$  y  $\text{PaO}_2$  (78).

Desde la descripción inicial del síndrome de dificultad respiratoria aguda (SDRA) en 1967, la presión de final de espiración positiva (PEEP) ha sido una parte esencial del manejo. Al aumentar el volumen pulmonar al final de la espiración, la PEEP permite que los alvéolos reclutados durante una respiración con presión positiva permanezcan abiertos durante todo el ciclo respiratorio, lo que reduce el cortocircuito intrapulmonar y aumenta la presión parcial y el contenido de oxígeno arterial. Sin embargo, también se ha reconocido que la PEEP podría reducir significativamente el retorno venoso, el gasto cardíaco y la presión arterial (78).

La capnografía de volumen se ha utilizado en la búsqueda de PEEP ideal. El reclutamiento alveolar reduce el espacio muerto alveolar y fisiológico al desviar el gas de los alvéolos previamente sobre ventilados y aumenta transitoriamente la excreción de  $\text{CO}_2$  al aumentar el área de superficie de la

interfaz gas-sangre. La sobredistensión alveolar, sin embargo, aumenta el espacio muerto y reduce la excreción de  $\text{CO}_2$ , ya que la ventilación alveolar excesiva y la compresión de los capilares pulmonares aumentan el número de alvéolos  $V/Q$  altos. El uso de la capnografía de volumen para optimizar el reclutamiento alveolar es particularmente atractivo porque las mediciones se pueden repetir fácilmente de forma regular o según lo dictado por los cambios en la condición clínica del paciente (78).

### **Capnografía para la Extubación Rápida o Durante el Destete de la Ventilación Mecánica**

La extubación rápida (FTE) es un método aceptado para desconectar a los pacientes de la ventilación mecánica (VM). La VM a largo plazo puede desencadenar ciertas complicaciones, como infección, atelectasia y aumento de la mortalidad. Con un manejo adecuado y retiro temprano del tubo endotraqueal se reducirían las complicaciones y costos. Utilizando una técnica de anestesia adecuada durante la cirugía y el manejo posquirúrgico, la FTE se puede aplicar sin complicaciones específicas (82).

La preparación de los pacientes para el destete generalmente se evalúa mediante el muestreo de gases en sangre arterial. Los gases en sangre arterial (ABG) se consideran el estándar de oro para evaluar los niveles de oxigenación y la ventilación durante la VM postoperatoria, sin embargo, este proceso presenta numerosos inconvenientes. Por lo tanto, para minimizar las complicaciones reportadas por la evidencia y tener un acceso más fácil, se debe considerar la monitorización continua de  $\text{CO}_2$  mediante un método no invasivo (82, 83).

La capnografía se ha convertido en el estándar de atención para la monitorización respiratoria básica de pacientes intubados en la unidad de cuidados intensivos. Además, se ha utilizado para ajustar los parámetros ventilatorios durante la ventilación mecánica (VM) (84). Sin embargo, sigue existiendo un debate sustancial sobre si la capnografía es útil durante el proceso de destete y extubación de la VM durante el período posoperatorio, pues su uso es controvertido, dado que existen numerosas diferencias entre los datos existentes y no hay recomendaciones similares (82, 84).

En un estudio observacional en el que se analizaron 82 mediciones, concluyó que las mediciones y el análisis de las características extraídas de un capnograma pueden diferenciar los resultados de la extubación en pacientes lactantes con VM, lo que reduce la inestabilidad fisiológica causada por la falla

en este proceso (84). En un estudio prospectivo observacional de pacientes con traumatismos intubados en el servicio de urgencias la correlación  $\text{EtCO}_2$   $\text{PaCO}_2$  fue pobre en  $R^2 = 0,277$ , por lo tanto, no debe usarse para guiar la ventilación en este tipo de pacientes (85).

En la retirada de la ventilación mecánica la capnografía puede servir para (31):

- Detectar respiraciones ineficaces y esfuerzos inspiratorios. En modalidades espontáneas, puede detectar movimientos respiratorios que movilizan únicamente el aire contenido en el espacio muerto. La curva del capnograma tendrá un ascenso pequeño o nulo y valores bajos de  $\text{PEtCO}_2$ , sin alcanzar la meseta característica de la fase III. También puede identificar esfuerzos respiratorios que no consiguen abrir la válvula inspiratoria, y distinguir las ventilaciones proporcionadas por el ventilador de las realizadas por el paciente.
- Valorar la frecuencia respiratoria y el patrón ventilatorio. Siguiendo la curva del capnograma se puede evaluar la frecuencia respiratoria y el patrón ventilatorio. En ventilación espontánea sirve para detectar la presencia de pausas espiratorias prolongadas y/o alteraciones del ritmo que pueden ser signos de la posibilidad de fracaso en la extubación.
- Detectar situaciones de ventilación de espacio muerto o cortocircuito pulmonar, mediante la valoración del gradiente  $\text{PEtCO}_2$ - $\text{PaCO}_2$ .

### **Capnografía en la Medicina del Sueño**

El polisomnograma es el método de diagnóstico “estándar de oro” para evaluar el sueño y las anomalías ventilatorias relacionadas. Con la evolución del interés clínico significativo en los trastornos respiratorios relacionados con el sueño, el uso de la polisomnografía se ha ampliado para incluir una evaluación más detallada de la respiración durante el sueño. El sueño cumple múltiples funciones en los seres humanos, incluidas las bioquímicas (secreción de hormonas anabólicas, síntesis de proteínas, conservación de energía), fisiológicas y neurológicas (86).

El sueño modifica los procesos químicos ( $\text{pH}$ ,  $\text{PaO}_2$  y  $\text{PaCO}_2$ ) y mecánicos (volumen pulmonar y tono muscular de las vías respiratorias superiores), modulando la ventilación además de eliminar el control consciente de la misma. El sueño se asocia a una disminución de la ventilación que se acentúa durante la progresión de las dos fases del sueño (movimiento ocular no rápido (NREM) a movimiento ocular rápido (REM), caracterizándose por una

disminución progresiva del volumen minuto, con un aumento de la  $\text{PaCO}_2$ , y una capacidad de respuesta embotada a este aumento (86).

La apnea obstructiva del sueño (AOS) se caracteriza por el cierre repetitivo de la vía aérea superior durante el sueño, lo que lleva a la excitación fuera del sueño y a la desaturación repetitiva durante y después de estos eventos, es decir una reducción sustancial (hipopnea) o un cese completo (apnea) del flujo de aire a pesar de los esfuerzos respiratorios continuos. Se trata de una enfermedad que no se caracteriza simplemente por su presencia o ausencia, sino, más bien, por su desarrollo a lo largo de un espectro de gravedad. El trastorno se asocia con importantes comorbilidades, incluida la somnolencia diurna excesiva y un mayor riesgo de enfermedad cardiovascular e implicaciones en la calidad de vida y salud mental (87, 88).

La capnografía puede añadir información significativa a la definición de los episodios obstructivos francos, ya que la señal de  $\text{CO}_2$  al final de la espiración se pierde por completo durante los episodios obstructivos y regresa con la recuperación de la permeabilidad de la vía aérea superior. Los cambios en la  $\text{PEtCO}_2$  secundarios a la obstrucción parcial de las vías respiratorias y las elevaciones de la  $\text{PEtCO}_2$  en el contexto de la hipoventilación obstructiva o las alteraciones persistentes de la resistencia de las vías respiratorias superiores también pueden definirse mediante la capnografía (86).

Además de proporcionar una importante herramienta complementaria en el ámbito clínico, la capnografía se aplica en el ámbito de la investigación como medio para evaluar los mecanismos de control ventilatorio en pacientes con apnea del sueño y comprender los efectos del tratamiento con presión positiva continua en la vía aérea (CPAP) sobre el control ventilatorio en la AOS (86).

Por último, esta tiene aplicaciones prácticas como herramienta de diagnóstico en pacientes con ictus y otros trastornos relacionados que pueden presentar un mayor riesgo de AOS, pero que probablemente tolerarían mal la polisomnografía (89).

La incorporación integral en la práctica clínica tiene un gran potencial para mejorar la evaluación del sueño en muchos pacientes (86). Un índice de apnea-hipopnea (IAH) basado en capnografía, calculado a partir de las ondas de dióxido de carbono espirado, se correlaciona significativamente con el IAH medido por polisomnografía (PSG). Sin embargo, la clasificación de las apneas e hipopneas no está bien validada. Para evaluar la hipoventilación

tilación durante la PSG de rutina, con frecuencia, el dióxido de carbono transcutáneo y el dióxido de carbono al final de la espiración son utilizados como marcadores sustitutos de la tensión arterial de dióxido de carbono ( $\text{PaCO}_2$ ). Además, el esfuerzo respiratorio podría evaluarse mediante bandas toracoabdominales, tiempo de tránsito del pulso (PTT) y electromiografía (EMG) del músculo diafragmático (90).

### **Capnografía en Ventilación Presión Positiva no Invasiva (VPPN)**

La ventilación con presión positiva no invasiva (NPPV, por sus siglas en inglés) es la administración de ventilación mecánica asistida sin necesidad de una vía aérea artificial invasiva. Es un medio seguro y eficaz para mejorar el intercambio gaseoso en pacientes con muchas formas de enfermedad respiratoria aguda (91).

La NPPV ha sido eficaz en el tratamiento de varias enfermedades respiratorias crónicas, estas enfermedades incluyen EPOC crónica estable con hiper-capnia, síndrome de hipoventilación por obesidad, apnea obstructiva del sueño, insuficiencia respiratoria secundaria a enfermedad neuromuscular y trastornos torácicos restrictivos (92).

Sin embargo, es posible que los ajustes de VNI determinados empíricamente no logren un apoyo ventilatorio óptimo. Por lo tanto, la eficacia de la VNI debe controlarse sistemáticamente. Los pacientes deben ser monitoreados de cerca en busca de signos de falla de ventilación e intubados de inmediato antes de que se desarrolle una crisis (93).

Las mejoras tecnológicas observadas en la monitorización volumétrica y basada en el tiempo del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) han aumentado la adopción de la capnografía en el monitoreo de la ventilación con presión positiva no invasiva. El carácter no invasivo tanto de la VPN como de la capnografía hace que la combinación sea atractiva para el manejo clínico de la insuficiencia respiratoria aguda y crónica (94).

La guía de práctica clínica de la American Association for Respiratory Care 2011 resume las indicaciones para el uso de la monitorización de  $\text{CO}_2$  durante la ventilación mecánica, incluye las relacionadas con terapia de ventilación con presión positiva no invasiva (NPPV) (76). Sin embargo, durante la ventilación no invasiva, medir el  $\text{CO}_2$  en el gas exhalado es difícil porque los ventiladores diluyen activamente el gas exhalado. Para obtener una medi-

ción precisa del  $\text{CO}_2$  al final de la espiración, es necesario llenar una celda de medición de  $\text{CO}_2$  con una cantidad adecuada de gas espirado antes de que el gas del ventilador llegue a la celda (94).

El principal problema de la medición de  $\text{CO}_2$  durante la ventilación no invasiva es que la elección de la ubicación del sitio de medición de  $\text{CO}_2$  está limitada al tamaño y peso del sensor. Durante la ventilación no invasiva, si el puerto de exhalación está ubicado cerca del sitio de medición de  $\text{CO}_2$ , sería difícil monitorear el  $\text{CO}_2$  con precisión ya que el puerto de exhalación generalmente elimina el gas de  $\text{CO}_2$  exhalado antes de alcanzar el sitio de medición  $\text{CO}_2$  (95).

### **Capnografía en Pacientes Pediátricos**

La capnografía ha demostrado ser un útil monitor perioperatorio no invasivo de la fisiología y seguridad del niño. En particular, la capnografía se usa durante la anestesia pediátrica de rutina para evaluar la ventilación y como medida sustituta de la presión de dióxido de carbono arterial ( $\text{PaCO}_2$ ) (41). Un artículo de revisión reveló una lista 44 aplicaciones clínicas diferentes o interpretaciones de la capnografía en niños, clasificadas en seis categorías: suministro de anestesia, vía aérea, respiración, circulación, homeostasis y no perioperatorio (96).

La capnografía tiene aplicaciones específicas de diagnóstico para pacientes pediátricos con cardiopatía congénita, enfermedad reactiva de las vías respiratorias, emergencias neurológicas y trastornos metabólicos. Esta modalidad permite la monitorización no invasiva y se ha convertido en el estándar de atención continua en las UCI (97). La guía de la ERC recomienda utilizar la capnografía en todos los niños intubados para detectar precozmente la obstrucción, la mala posición o el desplazamiento (73). Puede utilizarse tanto para la comprobación de la colocación como la monitorización de la colocación del tubo endotraqueal (98).

En recién nacidos el monitoreo de los niveles de dióxido de carbono, particularmente aquellos que requieren ventilación mecánica invasiva, es esencial para guiar las estrategias de soporte respiratorio. El mantenimiento de la normocapnia en los recién nacidos es vital debido al impacto adverso que los niveles extremos de presiones parciales de dióxido de carbono ( $\text{PCO}_2$ ) pueden tener sobre los resultados neurológicos, especialmente los nacidos extremadamente prematuros. Valores altos de  $\text{PCO}_2$  durante la primera 72 h después del nacimiento son un predictor dependiente de la dosis

de hemorragia intraventricular (HIV) en prematuros y partos bajos recién nacidos de peso (99).

La duración de los niveles bajos de  $PCO_2$  durante la primera semana después del nacimiento se ha relacionado con un riesgo posterior de desarrollar leucomalacia periventricular (PVL) (100) con niveles de  $PCO_2$  inferior a 30 mmHg en las primeras 48 horas, lo que pone a los lactantes en mayor riesgo (101).

Las fluctuaciones de  $PCO_2$  en bebés de muy bajo peso al nacer también se han relacionado con malos resultados del desarrollo neurológico a los 18 meses de edad en aquellos expuestos tanto a hipercapnia como a grandes fluctuaciones en valores de dióxido de carbono (102). La monitorización del dióxido de carbono ( $CO_2$ ) es vital durante la ventilación mecánica de los recién nacidos, ya que la morbilidad aumenta cuando los niveles de  $CO_2$  son inadecuados (103).

En los lactantes con ventilación mecánica, es útil para monitorear la integridad del circuito del ventilador para la detección temprana de percances, como la extubación traqueal accidental y la desconexión del circuito de respiración, antes de que se produzca un daño irreversible por hipoxia prolongada (104).

La capnografía al final de la espiración puede proporcionar a los médicos valores cuantitativos de  $CO_2$  al final de la espiración ( $EtCO_2$ ) y un seguimiento continuo de la forma de onda del capnograma en tiempo real. Estos dispositivos son cada vez más aceptados para su uso en la población neonatal, ya que los nuevos dispositivos son livianos y tienen un espacio muerto adicional mínimo. Sin embargo, se ha informado que tienen una precisión variable en comparación con las mediciones de  $CO_2$  arterial; no obstante, la divergencia de los resultados puede estar relacionada con la gravedad de la enfermedad más que con las limitaciones tecnológicas (103).

Durante la reanimación, el  $EtCO_2$  se puede detectar mediante capnografía más rápidamente que mediante colorimetría. Además, la capnografía se puede utilizar actualmente en entornos de investigación neonatal para determinar el espacio muerto fisiológico y la falta de homogeneidad de la ventilación y, por lo tanto, tiene potencial para ser beneficiosa para la atención clínica. En conclusión, los modos novedosos de monitoreo de dióxido de carbono no invasivo se pueden utilizar de manera segura y confiable en recién nacidos durante la ventilación mecánica (103).

Como un factor medible durante el soporte vital avanzado en pediatría la guía de la ERC recomienda que la capnografía sea obligatoria para controlar

la posición del tubo traqueal. Sin embargo, no permite identificar la intubación bronquial selectiva. Cuando se realiza durante la RCP, puede ayudar a detectar rápidamente la RCE. Los valores de EtCO<sub>2</sub> no deben utilizarse como indicador de calidad u objetivo durante el soporte vital avanzado pediátrico, ni como indicación a favor o en contra de la continuación de la RCP (73).

La capnografía puede proporcionar información sobre la efectividad de las compresiones torácicas, pero no se han establecido valores específicos en niños. No existen estudios en niños que indiquen cuales son los datos clínicos para valorar la eficacia de la RCP. Son necesarios estudios experimentales y clínicos que valoren si la tensión arterial y la capnografía pueden ser indicadores adecuados de la eficacia de la RCP y si se correlacionan con la recuperación de la circulación espontánea (98).

## Referencias

1. Albanese MHB, Barrera FP, Valenzuela CC, Gil D, Riquelme C, Olive F, et al. “Capnografía volumétrica y su aplicación en la monitorización de la ventilación mecánica.” *Revista Chilena de Medicina Intensiva*, vol. 34, no. 3, 2019, pp. 1-10.
2. Anderson CT, Breen PH. “Carbon dioxide kinetics and capnography during critical care.” *Critical Care (London, England)*,. 2000;4(4):207-15. doi:10.1186/cc696
3. Pantazopoulos C, Xanthos T, Pantazopoulos I, Papalois A, Kouskouni E, Iacovidou N. A Review of Carbon Dioxide Monitoring During Adult Cardiopulmonary Resuscitation.” *Heart, Lung and Circulation*, 2015;24(11):1053-61. doi:10.1016/j.hlc.2015.05.013
4. Duckworth RL. How to read and interpret end-tidal capnography waveforms. *JEMS*. 2017;42(8).
5. Ramsay M. “Ventilation Monitoring”. *Anesthesiology Clinics*. 2021;39(3):403-14. doi:10.1016/j.anclin.2021.03.006
6. Agudelo-Uribe JF, Ramirez-Barrera JD, Espinal-Montoya JA, Miranda-Arboleda AF, Saenz-Jaramillo G, Tobon-Upegui MP, et al. “Accuracy of Delta Capnography for the Prediction of Pulmonary Vein Occlusion During Cryoablation for Atrial Fibrillation”. *The Journal of in-*

- novations in cardiac rhythm management. 2022;13(3):4921–8. doi:10.19102/icrm.2022.130302
7. Long B, Koyfman A, Vivirito MA. “Capnography in the emergency department: a review of uses, waveforms, and limitations”. *The Journal of emergency medicine*. 2017;53(6):829–42. doi:https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2017.08.026
  8. Suchanek S, Grega T, Zavoral M. “The role of equipment in endoscopic complications”. *Best Pract Res Clin Gastroenterol*. 2016;30(5):667–78. doi:10.1016/j.bpg.2016.09.007
  9. Vijayam B, Supriyanto E, Malarvili MB. “Digitization and Analysis of Capnography Using Image Processing Technique”. *Front Digit Health*. 2021;3:723204. doi:10.3389/fdgth.2021.723204
  10. Saha C. “Capnography, Second Edition”. *Anesthesiology*. 2012;116(3):744–5. doi:10.1097/ALN.0b013e3182423593
  11. Siobal MS. “Monitoring Exhaled Carbon Dioxide”. *Respiratory care*. 2016;61(10):1397. doi:10.4187/respcare.04919
  12. Sun X, Yang W, Gong S, Liang S, Gu S, Lu H, et al. “Diagnostic value of volumetric capnography in patients with chronic cough variant asthma”. *Clinics (Sao Paulo, Brazil)*. 2020;75:e1662. doi:10.6061/clinics/2020/e1662
  13. Pertzov B, Ronen M, Rosengarten D, Shitenberg D, Heching M, Shostak Y, et al. “Use of capnography for prediction of obstruction severity in non-intubated COPD and asthma patients”. *Respir Res*. 2021;22(1):154. doi:10.1186/s12931-021-01747-3
  14. Brown RH, Brooker A, Wise RA, Reynolds C, Loccioni C, Russo A, et al. “Forced expiratory capnography and chronic obstructive pulmonary disease (COPD)”. *J Breath Res*. 2013;7(1):017108. doi:10.1088/1752-7155/7/1/017108
  15. Abid A, Mieloszyk RJ, Verghese GC, Krauss BS, Heldt T. Model-Based “Estimation of Respiratory Parameters from Capnography, With Application to Diagnosing Obstructive Lung Disease”. *IEEE transactions on bio-medical engineering*. 2017;64(12):2957–67. doi:10.1109/tbme.2017.2699972
  16. Veronez L, Moreira MM, Soares ST, Pereira MC, Ribeiro MA, Ribeiro JD, et al. “Volumetric capnography for the evaluation of pulmonary disease

- in adult patients with cystic fibrosis and noncystic fibrosis bronchiectasis”. *Lung*. 2010;188(3):263-8. doi:10.1007/s00408-009-9213-z
17. Fouzas S, Kentgens AC, Lagiou O, Frauchiger BS, Wyler F, Theodorakopoulos I, et al. “Novel volumetric capnography indices measure ventilation inhomogeneity in cystic fibrosis”. *ERJ Open Res*. 2022;8(1). doi:10.1183/23120541.00440-2021
  18. Lopez E, Mathlouthi J, Lescure S, Krauss B, Jarreau PH, Moriette G. “Capnography in spontaneously breathing preterm infants with bronchopulmonary dysplasia”. *Pediatr Pulmonol*. 2011;46(9):896-902. doi:10.1002/ppul.21445
  19. Fouzas S, Häcki C, Latzin P, Proietti E, Schulzke S, Frey U, et al. “Volumetric capnography in infants with bronchopulmonary dysplasia”. *The Journal of pediatrics*. 2014;164(2):283-8.e1-3. doi:10.1016/j.jpeds.2013.09.034
  20. Prentice D, Deroche CB, Wipke-Tevis DD. “Excluding Pulmonary Embolism with End-tidal Carbon Dioxide: Accuracy, Cost, and Harm Avoidance”. *Western journal of nursing research*. 2020;42(12):1022-30. doi:10.1177/0193945920914492
  21. Songur Yücel Z, Metin Aksu N, Akkaş M. “The combined use of end-tidal carbon dioxide and alveolar dead space fraction values in the diagnosis of pulmonary embolism”. *Pulmonology*. 2020;26(4):192-7. doi:10.1016/j.pulmoe.2019.11.008
  22. Hatlestad D. “Capnography as a predictor of the return of spontaneous circulation”. *Emergency medical services*. 2004;33(8):75-80; quiz 115.
  23. Arena R, Guazzi M, Myers J, Chase P, Bensimhon D, Cahalin LP, et al. “Prognostic value of capnography during rest and exercise in patients with heart failure”. *Congestive heart failure (Greenwich, Conn)*. 2012;18(6):302-7. doi:10.1111/j.1751-7133.2012.00296.x
  24. Elam JO, Brown ES, Ten Pas RH. “Carbon dioxide homeostasis during anesthesia. I. Instrumentation”. *Anesthesiology*. 1955;16(6):876-85. doi:10.1097/00000542-195511000-00006
  25. Elam JO, Brown ES. “Carbon dioxide homeostasis during anesthesia. II. Total sampling for determination of dead space, alveolar ventilation, and carbon dioxide output”. *Anesthesiology*. 1955;16(6):886-902. doi:10.1097/00000542-195511000-00007

26. Elam JO, Brown ES. "Carbon dioxide homeostasis during anesthesia. III. Ventilation and carbon dioxide elimination". *Anesthesiology*. 1956;17(1):115-27.
27. Elam JO, Brown ES. "Carbon dioxide homeostasis during anesthesia. IV. An evaluation of the partial rebreathing system". *Anesthesiology*. 1956;17(1):128-34. doi:10.1097/00000542-195601000-00018
28. Thompson JE, Jaffe MB. "Capnographic waveforms in the mechanically ventilated patient". *Respiratory care*. 2005;50(1):100-8; discussion 8-9.
29. Smalhout B, Z. K. *An atlas of capnography*. Utrecht: Institute of Anaesthesiology, University Hospital Utrecht; 1981.
30. Díez-Picazo LD, Barrado-Muñoz L, Blanco-Hermo P, Barroso-Matilla S, Espinosa Ramírez S. "La capnografía en los servicios de emergencia médica". *Medicina de Familia Semergen*. 2009;35(3):138-43. doi:10.1016/S1138-3593(09)70721-X
31. Lasaosa, FJ Cambra, and M. Pons Ódena. "Pulsioximetría y capnografía." *Anales de Pediatría*. Vol. 59. No. 3. Elsevier Doyma, 2003. doi:10.1016/s1695-4033(03)78176-4
32. Nassar BS, Schmidt GA. "Capnography During Critical Illness". *Chest*. 2016;149(2):576-85. doi:10.1378/chest.15-1369
33. Rackley CR. "Monitoring During Mechanical Ventilation". *Respiratory care*. 2020;65(6):832-46. doi:10.4187/respcare.07812
34. Kodali Bhavani S. "Capnography Outside the Operating Rooms". *Anesthesiology*. 2013;118(1):192-201. doi:10.1097/ALN.0b013e318278c8b6
35. Verscheure S, Massion PB, Verschuren F, Damas P, Magder S. "Volumetric capnography: lessons from the past and current clinical applications". *Critical Care*. 2016;20(1). doi:10.1186/s13054-016-1377-3
36. Huang CH, Wei KH. "Applications of capnography in airway management outside the operating room". *Signa Vitae*. 2021;17(4):18-24. doi:10.22514/sv.2021.061
37. Kerslake I, Kelly F. "Uses of capnography in the critical care unit". *BJA Education*. 2017;17(5):178-83. doi:10.1093/bjaed/mkw062

38. Krauss B, Falk JL, Ladde JG. "Carbon dioxide monitoring (capnography)". *UpToDate* [Internet]. 2020. Available from: <https://www.medilib.ir/uptodate/show/273>.
39. Long B. "Interpreting Waveform Capnography: Pearls and Pitfalls" *Signa Vitae* 17.4. 18 August 2022. Available from: <http://www.emdocs.net/interpreting-waveform-capnography-pearls-and-pitfalls/>.
40. Gravenstein JS, Jaffe MB, Gravenstein N, Paulus DA, eds. Ventilation. In: *Capnography*. Cambridge University Press; 2011:10-460.
41. Humphreys S, Schibler A, von Ungern-Sternberg BS. "Carbon dioxide monitoring in children-A narrative review of physiology, value, and pitfalls in clinical practice". *Paediatric anaesthesia*. 2021;31(8):839-45. doi:<https://doi.org/10.1111/pan.14208>
42. Jaffe MB. "Using the features of the time and volumetric capnogram for classification and prediction". *Journal of clinical monitoring and computing*. 2017;31(1):19-41. doi:10.1007/s10877-016-9830-z
43. Paulus DA, Gravenstein JS, Jaffe MB, Gravenstein N. *Capnography*. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2011.
44. Aminiahidashti H, Shafiee S, Kiasari AZ, Sazgar M. "Applications of end-tidal carbon dioxide (ETCO<sub>2</sub>) monitoring in emergency department; a narrative review". *Emergency*. 2018;6(1).
45. Pérez de Mendiguren Monreal P. *Guía rápida y póster sobre capnografía* [Trabajo fin de grado]: Universidad Pública de Navarra; 2017.
46. Jaffe MB, editor *Mainstream or Sidestream Capnography?* 2002.
47. Pickett RA, Owens K, Landis P, Sara R, Lim HW. "Cryoballoon-to-Pulmonary Vein Occlusion Assessment via Capnography Technique: Where Does Occlusion Testing by End-Tidal CO<sub>2</sub> Measurement 'Fit' as a Predictor of Long-Term Efficacy?" *Journal of atrial fibrillation*. 2018;11(1):2055. doi:10.4022/jafib.2055
48. Cretikos MA, Bellomo R, Hillman K, Chen J, Finfer S, Flabouris A. "Respiratory rate: the neglected vital sign". *Medical Journal of Australia*. 2008;188(11):657-9. doi:<https://doi.org/10.5694/j.1326-5377.2008.tb01825.x>
49. Davis DP. "Capnography as a guide to ventilation in the field". In: "Capnography. 2 ed". editado por Paulus DA, Gravenstein JS, Jaffe MB, Gravenstein N. Cambridge: Cambridge University Press; 2011. p. 72-9.

50. Ortega R, Connor C, Kim S, Djang R, Patel K. “Monitoring ventilation with capnography”. *N Engl J Med*. 2012;367(19):e27. doi:10.1056/NEJMcem1105237
51. Williams GW, 2nd, George CA, Harvey BC, Freeman JE. “A Comparison of Measurements of Change in Respiratory Status in Spontaneously Breathing Volunteers by the ExSpirom Noninvasive Respiratory Volume Monitor Versus the Capnostream Capnometer”. *Anesth Analg*. 2017;124(1):120-6. doi:10.1213/ane.0000000000001395
52. Lam T, Nagappa M, Wong J, Singh M, Wong D, Chung F. “Continuous Pulse Oximetry and Capnography Monitoring for Postoperative Respiratory Depression and Adverse Events: A Systematic Review and Meta-analysis”. *Anesthesia and Analgesia*. 2017;125(6):2019-29. doi:10.1213/ANE.0000000000002557
53. Goenaga-Diaz EJ, Smith LD, Pecorella SH, Smith TE, Russell GB, Johnson KN, et al. “A comparison of the breathing apparatus deadspace associated with a supraglottic airway and endotracheal tube using volumetric capnography in young children”. *Korean journal of anesthesiology*. 2021;74(3):218-25. doi:10.4097/kja.20518
54. Klein AA, Meek T, Allcock E, Cook TM, Mincher N, Morris C, et al. “Recommendations for standards of monitoring during anaesthesia and recovery 2021”. *Anaesthesia*. 2021;76(9):1212-23. doi:https://doi.org/10.1111/anae.15501
55. Sethi AK, Salhotra R, Chandra M, Mohta M, Bhatt S, Kayina CA. “Confirmation of placement of endotracheal tube - A comparative observational pilot study of three ultrasound methods”. *Journal of anaesthesiology, clinical pharmacology*. 2019;35(3):353-8. doi:10.4103/joacp.JOACP\_317\_18
56. Ornato JP, Shipley JB, Racht EM, Slovis CM, Wrenn KD, Pepe PE, et al. “Multicenter study of a portable, hand-size, colorimetric end-tidal carbon dioxide detection device”. *Ann Emerg Med*. 1992;21(5):518-23. doi:10.1016/s0196-0644(05)82517-x
57. Grmec S. “Comparison of three different methods to confirm tracheal tube placement in emergency intubation”. *Intensive Care Med*. 2002;28(6):701-4. doi:10.1007/s00134-002-1290-x
58. Frerk C, Mitchell VS, McNarry AF, Mendonca C, Bhagrath R, Patel A, et al. “Difficult Airway Society 2015 guidelines for management of unanticipated difficult intubation in adults”. *Br J Anaesth*. 2015;115(6):827-48.

59. Corbett G, Pugh P, Herre J, See TC, de Monte Verde-Robb D, Torrejon Torres R, et al. "Service Evaluation of the Impact of Capnography on the Safety of Procedural Sedation". *Front Med (Lausanne)*. 2022;9:867536. doi:10.3389/fmed.2022.867536
60. Deitch K, Miner J, Chudnofsky CR, Dominici P, Latta D. "Does end tidal CO<sub>2</sub> monitoring during emergency department procedural sedation and analgesia with propofol decrease the incidence of hypoxic events? A randomized, controlled trial". *Ann Emerg Med*. 2010;55(3):258-64. doi:10.1016/j.annemergmed.2009.07.030
61. Beitz A, Riphaut A, Meining A, Kronshage T, Geist C, Wagenpfeil S, et al. "Capnographic monitoring reduces the incidence of arterial oxygen desaturation and hypoxemia during propofol sedation for colonoscopy: a randomized, controlled study (ColoCap Study)". *The American journal of gastroenterology*. 2012;107(8):1205-12. doi:10.1038/ajg.2012.136
62. Saunders R, Struys M, Pollock RF, Mestek M, Lightdale JR. "Patient safety during procedural sedation using capnography monitoring: a systematic review and meta-analysis". *BMJ open*. 2017;7(6):e013402. doi:10.1136/bmjopen-2016-013402
63. Weaver J. "The latest ASA mandate: CO<sub>2</sub> monitoring for moderate and deep sedation". *Anesthesia progress*. 2011;58(3):111-2. doi:10.2344/0003-3006-58.3.111
64. Hinkelbein J, Lamperti M, Akeson J, Santos J, Costa J, De Robertis E, et al. "European Society of Anaesthesiology and European Board of Anaesthesiology guidelines for procedural sedation and analgesia in adults". *Eur J Anaesthesiol*. 2018;35(1):6-24. doi:10.1097/eja.0000000000000683
65. Vargo JJ, Zuccaro G, Jr., Dumot JA, Conwell DL, Morrow JB, Shay SS. "Automated graphic assessment of respiratory activity is superior to pulse oximetry and visual assessment for the detection of early respiratory depression during therapeutic upper endoscopy". *Gastrointestinal endoscopy*. 2002;55(7):826-31. doi:10.1067/mge.2002.124208
66. Arakawa H, Kaise M, Sumiyama K, Saito S, Suzuki T, Tajiri H. "Does pulse oximetry accurately monitor a patient's ventilation during sedated endoscopy under oxygen supplementation?" *Singapore medical journal*. 2013;54(4):212-5. doi:10.11622/smedj.2013075

67. Waugh JB, Epps CA, Khodneva YA. “Capnography enhances surveillance of respiratory events during procedural sedation: a meta-analysis”. *Journal of clinical anesthesia*. 2011;23(3):189-96. doi:10.1016/j.jclinane.2010.08.012
68. Paiva EF, Paxton JH, O’Neil BJ. “The use of end-tidal carbon dioxide (ETCO<sub>2</sub>) measurement to guide management of cardiac arrest: A systematic review”. *Resuscitation*. 2018;123:1-7. doi:10.1016/j.resuscitation.2017.12.003
69. Cereceda-Sánchez FJ, Molina-Mula J. “Use of supraglottic airway devices under capnography monitoring during cardiopulmonary resuscitation: A systematic review”. *Australian Critical Care*. 2021;34(3):287-95. doi:10.1016/j.aucc.2020.07.005
70. van Schuppen H, Boomars R, Kooij FO, den Tex P, Koster RW, Hollmann MW. “Optimizing airway management and ventilation during prehospital advanced life support in out-of-hospital cardiac arrest: A narrative review”. *Best Practice & Research-Clinical Anaesthesiology*. 2021;35(1):67-82. doi:10.1016/j.bpa.2020.11.003
71. American Heart Association. *Guidelines for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care*. *Circulation*. 2020;142(suppl 2):S337-S57. doi:10.1161/CIR.0000000000000918
72. Cereceda-Sánchez FJ, Molina-Mula J. “Systematic Review of Capnography with Mask Ventilation during Cardiopulmonary Resuscitation Maneuvers”. *Journal of clinical medicine*. 2019;8(3). doi:10.3390/jcm8030358
73. Perkins GD, Graesner JT, Semeraro F, Olasveengen T, Soar J, Lott C, et al. “European Resuscitation Council Guidelines 2021: Executive summary”. *Resuscitation*. 2021;161:1-60. doi:10.1016/j.resuscitation.2021.02.003
74. Neth MR, Idris A, McMullan J, Benoit JL, Daya MR. “A review of ventilation in adult out-of-hospital cardiac arrest”. *Journal of the American College of Emergency Physicians Open*. 2020;1(3):190-201. doi:10.1002/emp2.12065
75. Sandroni C, De Santis P, D’Arrigo S. “Capnography during cardiac arrest”. *Resuscitation*. 2018;132:73-7. doi:10.1016/j.resuscitation.2018.08.018
76. Walsh BK, Crotwell DN, Restrepo RD. “Capnography/Capnometry during mechanical ventilation: 2011”. *Respiratory care*. 2011;56(4):503-9. doi:10.4187/respcare.01175

77. Kang Y. "Management of post-cardiac arrest syndrome". *Acute and critical care*. 2019;34(3):173-8. doi:10.4266/acc.2019.00654
78. Kreit JW. "Volume Capnography in the Intensive Care Unit: Potential Clinical Applications". *Ann Am Thorac Soc*. 2019;16(4):409-20. doi:10.1513/AnnalsATS.201807-502CME
79. Al-Subu A, Jooste E, Hornik CP, Fleming GA, Cheifetz IM, Ofori-Amanfo G. "Correlation between minute carbon dioxide elimination and pulmonary blood flow in single-ventricle patients after stage 1 palliation and 2-ventricle patients with intracardiac shunts: A pilot study". *Paediatr Anaesth*. 2018;28(7):618-24. doi:10.1111/pan.13423
80. Peyton PJ, Wallin M, Hallbäck M. "New generation continuous cardiac output monitoring from carbon dioxide elimination". *BMC anesthesiology*. 2019;19(1):28-. doi:10.1186/s12871-019-0699-5
81. Karlsson J, Lonnqvist PA. "Capnodynamics-Measuring cardiac output via ventilation". *Paediatric anaesthesia*. 2022;32(2):255-61. doi:10.1111/pan.14329
82. Moradian ST, Beitollahi F, Ghiasi MS, Vahedian-Azimi A. "Capnography and Pulse Oximetry Improve Fast Track Extubation in Patients Undergoing Coronary Artery Bypass Graft Surgery: A Randomized Clinical Trial". *Front Surg*. 2022;9:826761. doi:10.3389/fsurg.2022.826761
83. Gerdung CA, Adeleye A Fau - Kirk VG, Kirk VG. "Noninvasive monitoring of CO<sub>2</sub> during polysomnography: a review of the recent literature". *Current opinion in pulmonary medicine*. 2016;22(6):527-34. doi:https://doi.org/10.1097/MCP.0000000000000320
84. Rasera CC, Gewehr PM, Domingues AM. "PET(CO<sub>2</sub>) measurement and feature extraction of capnogram signals for extubation outcomes from mechanical ventilation". *Physiological measurement*. 2015;36(2):231-42. doi:10.1088/0967-3334/36/2/231
85. Warner KJ, Cuschieri J, Garland B, Carlbom D, Baker D, Copass MK, et al. *The utility of early end-tidal capnography in monitoring ventilation status after severe injury*. *J Trauma*. 2009;66(1):26-31. doi:10.1097/TA.0b013e3181957a25
86. Troy P, Gilmartin G. "Capnography in sleep medicine". In: *Capnography*. 2 ed Editors Paulus DA, Gravenstein JS, Jaffe MB, Gravenstein N. Cambridge: Cambridge University Press; 2011. p. 96-101.

87. Slowik JM, Sankari A, Collen JF. “Obstructive Sleep Apnea. StatPearls”. *Treasure Island (FL): StatPearls Publishing Copyright © 2022, StatPearls Publishing LLC.; 2022.*
88. Rundo JV. “Obstructive sleep apnea basics”. *Cleveland Clinic journal of medicine.* 2019;86(9 Suppl 1):2-9. doi:10.3949/ccjm.86.s1.02
89. Dziewas R HB, Humpert M, Böntert M, Dittrich R, Lüdemann P, Young P, Ringelstein EB, Nabavi DG. “Capnography screening for sleep apnea in patients with acute stroke”. *Neurol Res.* 2005;27(1):83-7. doi:10.1179/016164105X18359
90. Randerath W, Verbraecken J, Andreas S, Arzt M, Bloch KE, Brack T, et al. “Definition, discrimination, diagnosis and treatment of central breathing disturbances during sleep”. *European Respiratory Journal.* 2017;49(1):1600959. doi:10.1183/13993003.00959-2016
91. Antonelli M, Conti G. “Noninvasive positive pressure ventilation as treatment for acute respiratory failure in critically ill patients”. *Critical care (London, England).* 2000;4(1):15-22. doi:10.1186/cc645
92. Gong Y, Sankari A. “Noninvasive Ventilation”. *StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing Copyright © 2022, StatPearls Publishing LLC.; 2022.*
93. Georges M, Rabec C, Monin E, Aho S, Beltramo G, Janssens JP, et al. “Monitoring of noninvasive ventilation: comparative analysis of different strategies”. *Respir Res.* 2020;21(1):324. doi:10.1186/s12931-020-01586-8
94. Orr JA, Jaffe MB, Seiver A. Capnography in non-invasive positive pressure ventilation. In: *Capnography.* 2 ed. editors Paulus DA, Gravenstein JS, Jaffe MB, Gravenstein N,. Cambridge: Cambridge University Press; 2011. p. 135-44.
95. Baba Y, Takatori F, Inoue M, Matsubara I, editors. *A Novel Mainstream Capnometer System for Non-invasive Positive Pressure Ventilation.* 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC); 2020 20-24 July 2020.
96. Eipe N, Doherty DR. “A review of pediatric capnography”. *Journal of clinical monitoring and computing.* 2010;24(4):261-8. doi:10.1007/s10877-010-9243-3

97. Riley CM. “Continuous Capnography in Pediatric Intensive Care”. *Crit Care Nurs Clin North Am.* 2017;29(2):251-8. doi:10.1016/j.cnc.2017.01.010
98. López-Herce J, Yunge M, Campos-Miño S, Raúl N, López-Herce J, Cyunel M, et al. Consenso Latinoamericano RCP SLACIP. 2021;29. doi:10.47464/10.47464/MetroCiencia/vol29/supple1
99. Kaiser JR, Gauss CH, Pont MM, Williams DK. “Hypercapnia during the first 3 days of life is associated with severe intraventricular hemorrhage in very low birth weight infants”. *J Perinatol.* 2006;26(5):279-85. doi:10.1038/sj.jp.7211492
100. Shankaran S, Langer JC, Kazzi SN, Lupton AR, Walsh M. “Cumulative index of exposure to hypocarbia and hyperoxia as risk factors for periventricular leukomalacia in low birth weight infants”. *Pediatrics.* 2006;118(4):1654-9. doi:10.1542/peds.2005-2463
101. Erickson SJ, Grauaug A, Gurrin L, Swaminathan M. “Hypocarbia in the ventilated preterm infant and its effect on intraventricular haemorrhage and bronchopulmonary dysplasia”. *J Paediatr Child Health.* 2002;38(6):560-2. doi:10.1046/j.1440-1754.2002.00041.x
102. McKee LA, Fabres J, Howard G, Peralta-Carcelen M, Carlo WA, Ambalavanan N. “PaCO<sub>2</sub> and neurodevelopment in extremely low birth weight infants”. *J Pediatr.* 2009;155(2):217-21 e1. doi:10.1016/j.jpeds.2009.02.024
103. Williams E, Dassios T, Greenough A. “Carbon dioxide monitoring in the newborn infant”. *Pediatr Pulmonol.* 2021;56(10):3148-56. doi:10.1002/ppul.25605
104. Schmalisch G. “Current methodological and technical limitations of time and volumetric capnography in newborns”. *BioMedical Engineering OnLine.* 2016;15(1):104. doi:10.1186/s12938-016-0228-4