www.medigraphic.org.mx

Rev. Mex. Anest.
1988; 11:190-194

Artículo de revisión

LA CAPNOGRAFIA EN ANESTESIOLOGIA

*EDUARDO HERRERA S.

RESUMEN

Se hace una sistematización de las bases fisiológicas y técnicas de la capnografía, así como de sus aplicaciones en la práctica anestésica. Para el monitoreo transanestésico de la ventilación de capnografía nos informa sobre la presión inspiratoria de CO_2 ($PICO_2$), la presión de CO_2 al final de la espiración ($PECO_2$) y la morfología del capnograma. Se concluye que la capnografía no sólo informa sobre la ventilación sino que aporta información sobre el estado de la circulación, metabolismo y función toraco-pulmonar en general.

Palabras clave: Capnografía. PIO_2, $PECO_2$. Monitoreo transanestésico.

SUMMARY

This paper systematizes the physiological bases and techniques of the capnography, its applications in anesthesia. In transanesthetic ventilation monitoring, capnography reports about CO_2 inspiratory pressure ($PICO_2$), CO_2 pressure at the end of exhalation ($PECO_2$) and the capnogram morphology. It's concluded that capnography informs about ventilation and supply information related to circulation, metabolism and thoraco-pulmonar function.

Key words: Capnography, PIO_2, $PECO_2$. Transanesthetic monitoring.

La capnografía es el estudio de la curva del CO_2 expirado producida por el monitoreo de los gases respiratorios. La aplicación de la absorción de los rayos infrarojos para el análisis del CO_2 fue descubierta por Luft en 1943.

Los gases hetero-atómicos absorben los rayos infrarojos de diferente longitud de onda. A cada gas le corresponde una o varias bandas de absorción las cuales le son específicas. Entre los gases que poseen un espectro de absorción de rayos infrarojos se encuentran el CO_2 el CO, el vapor de agua, el N_2O, el halothano, el methoxiflurano, el tricloroetileno y el cloroformo. Los gases nobles monoatómicos y diatómicos simples como el O_2, el N_2 y el H_2 no poseen esta característica. El resultado de la absorción se puede expresar cuantitativamente (de esta forma se obtiene el CO_2 en volúmenes por ciento en mm Hg) o graficamente obteniendo así la forma de un capnograma.

FISIOLOGIA DEL CO_2 EN EL ORGANISMO

1. Definición de variables.

Durante una inspiración, el volumen corriente (VT) pasa a través del espacio muerto anatómico (VD ant) para terminar en el espacio alveolar (VA). La sangre venosa mezclada envuelve el espacio alveolar en donde se lleva a cabo el intercambio gaseoso. El CO_2 difunde hacia el espacio alveolar según el gradiente de concentración y el oxígeno difunde hacia la sangre para resaturar la hemoglobina.

La ventilación minuto efectiva (VE) se puede calcular: VE = frecuencia respiratoria (f) X VT

La ventilación pulmonar está compuesta de dos variables:

– La ventilación minuto del espacio muerto ($\dot{V}D$)

– La ventilación minuto del espacio alveolar ($\dot{V}A$)

La ventilación minuto del espacio muerto incluye la ventilación del espacio muerto anatómico el cual es prácticamente constante y del espacio muerto alveolar el cual varía dependiendo del estado patológico de los pulmones. La relación entre el espacio muerto (VD) y el volumen corriente (VT) tiene una importancia práctica (VD/VT), así como la proporción de la ventilación

*Médico Jefe.
Trabajo desarrollado en la Clínica del Servicio de Anestesiología y Reanimación. Hospital Cantonal de Fribourg, Suiza.
Recibido: 2 de febrero de 1988. Aceptado: 16 de marzo de 1988.
Sobretiros: Eduardo Herrera-S. Hospital Cantonal de Fribourg, Suiza.

alveolar minuto (VA) como parte de la ventilación minuto efectiva ($\dot{V}A/\dot{V}E$).

La ventilación alveolar minuto se puede definir como:

$VA = f \times (VT - VD)$

o $VA = VE - VD$

o $VA = VE (1 - VD / VT)$

En general, se puede decir que el CO_2 expirado ($VECO_2$) debe de ser igual a la cantidad de CO_2 producida en los tejidos ($VMCO_2$). La concentración de CO_2 en el espacio alveolar ($FACO_2$) es el resultado dinámico de la producción de CO_2 y de la ventilación alveolar

$$FACO_2 = \frac{VMCO_2}{VA}$$

Por otra parte, el CO_2 expirado depende de la concentración alveolar de CO_2 y de la ventilación alveolar

$VECO_2 = FACO_2 \times VA$

Así es que la presión parcial de CO_2 en el alveolo ($PaCO_2$) depende de la presión barométrica (PB), de la concentración inspirada de CO_2 ($FICO_2$), de la producción tisular de CO_2 y de la ventilación alveolar

$$PACO_2 = PB \times \left(FICO_2 + \frac{VMCO_2}{VA}\right)$$

La sangre que sale de los alveolos está mezclada con la sangre de los vasos del parénquima pulmonar (sangre venosa mezclada) y con la sangre que perfunde los alveolos no ventilados (VD alv). Esto conduce a una diferencia alveolo-arterial de CO_2 (ΔCO_2)

$PACO_2 = \Delta CO_2 + PACO_2$

El valor normal de la ΔCO_2 es de 2 a 5 mm Hg, pero puede aumentar en forma importante en situaciones patológicas.

Como el gas al final de la expiración (end tidal) tiene su origen en el alveolo, por razones prácticas se puede decir que:

$P(ETCO_2) = PACO_2$

Cuando existe una discrepancia importante de esta fórmula quiere decir que hay un estado patológico en la depuración del CO_2; existen múltiples razones que pueden aumentar la ΔCO_2 entre las cuales encontramos:

- Aumento del espacio muerto alveolar
- Aumento del número de alveolos colapsados
- Corto-circuito anatómico
- Alteración de la relación ventilación/perfusión
- Alteración aguda de la ventilación o de la circulación
- Problemas técnicos del análisis

De hecho, la diferencia alveolo-arterial se puede utilizar como parámetro de un estado patológico del sistema cardiorespiratorio. En los casos de pacientes con riesgo elevado, se recomienda hacer una gasometría arterial de control. La diferencia A-a de la $P\dot{C}O_2$ es relativamente constante durante la anestesia general. Un cambio de esta diferencia A-a, sin importar el sentido del cambio, sugiere una modificación del estado patológico. La diferencia A-a CO_2 sigue reglas diferentes que la diferencia A-aO_2 la cual depende básicamente de la FIO_2, mientras que la primera nos manifiesta la eficacidad de la VA y de la $VECO_2$.

2. Transporte del CO_2

A partir del momento en el que el CO_2 se produce, éste difunde a través del citoplasma celular y del líquido extracelular según el gradiente de presión para entrar a los capilares. De esta forma el CO_2 es transportado en la sangre hacia los pulmones en donde se equilibra con el contenido alveolar de CO_2.

El CO_2 es transportado en la sangre de la siguiente forma:

– Como gas fisicamente disuelto:

A 37°, 0.0308 mmol de CO_2 por mm Hg PCO_2 está disuelto en un litro de sangre.

– Como ácido carbónico

$CO_2 + H_2O \leftrightarrows H_2CO_3$

– En el ion bicarbonato

El ácido carbónico está disociado.

$H_2CO_3 \rightleftarrows H^+ + HCO_3^- \rightleftarrows 2H^+ + CO_3^{-}$ – –

En condiciones fisiológicas alrededor del 96% del ácido carbónico se encuentra en forma disociada.

– En los grupos carbaminados combinado al ámino-ácido terminal de las proteínas. La parte más importante del transporte carbaminado se realiza en los eritrocitos donde el CO_2 ligado depende de la reducción de la hemoglobina; así que la oxigenación de la hemoglobina disminuye la capacidad de fijación del CO_2 y la reducción de la hemoglobina aumenta la capacidad de transporte del CO_2. Este mecanismo participa en forma importante del efecto Haldane, el cual es la diferencia de la cantidad de CO_2 transportada. El resto del efecto Haldane depende de la capacidad de la hemoglobina reducida como buffer (figura 1).

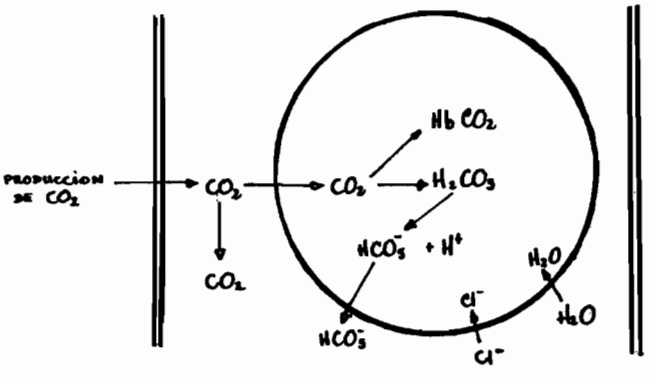

Figura 1.

3. Homeostasis del CO_2

Para mantener la homeostasis normalmente hay un sistema que compensa al otro. Así por ejemplo, en el caso de un aumento de la $PaCO_2$ debido a un aumento de la producción del CO_2, la homeostasis se mantiene aumentando la ventilación alveolar para eliminar más co_2 y de esta forma mantener la $PaCO_2$ dentro de límites normales. Esto se lleva a cabo gracias al mecanismo de regulación de la $PaCO_2$, pero a su vez este mecanismo puede estar perturbado después de un tratamiento, una infección, una intoxicación o en forma iatrogénica como es el caso de la anestesia general.

Actualmente se conocen bien los efectos secundarios, ya sea agudos o tardios, de valores extremos de la $PaCO_2$.

Una desviación innecesaria del CO_2 provoca un desequilibrio importante de otro sistema homeostático, es decir, el equilibrio ácido-base. En forma particular las alteraciones agudas de la $PaCO_2$ conducen a cambios importantes del pH, éstos a su vez provocan movimientos electrolíticos especialmente del potasio, arritmias y otras complicaciones.

Por todas estas razones la vigilancia y el monitoreo de la $PaCO_2$ es de una importancia irredituable. La capnografía facilita esta vigilancia del CO_2 en casi la totalidad de los pacientes y además la capnografía nos aporta múltiples informaciones sobre otras variables.

Dentro de los efectos de una hiper o hipoventilación encontramos.

– Acidosis o alcalosis respiratoria
  *Cambios del pH
  *Movimientos electrolíticos (K^+, Cl^-)
  *Alteración de la circulación cerebral
  *Alteración de la circulación coronaria
  *Alteración de la emergencia de la anestesia general
  *Diferentes problemas perioperatorios

TECNOLOGIA

El principio físico de la media del CO_2 expirado más frecuentemente utilizado es por medio de la absorción de rayos infrarojos. También existe el uso de espectrómetros de masa pero son relativamente caros y la calibración de estos aparatos es complicada.

Los capnógrafos se dividen en dos: con sistema de aspiración y sin sistema de aspiración. Los capnógrafos con sistema de aspiración, aspiran el gas hasta la célula de lectura situada dentro del aparato y la medida se hace en referencia a un gas testigo incluido en la cámara de medición. Las principales ventajas de este tipo de capnógrafos son: la posibilidad de utilización con cualquier tipo de ventilación y presenta un estorbo mínimo al nivel del circuito-paciente. Por otro lado tienen ciertos defectos importantes de conocer. La velocidad de ascención del capnograma después de un cambio brutal del CO_2 varía conforme al flujo de aspiración y de esta forma, la respuesta se modifica. Así es que si el tiempo de respuesta es superior a la frecuencia respiratoria, los valores de la $FICO_2$ y de la $PETCO_2$ registrados se vuelven falsos. Este fenómeno es importante tomarlo en consideración sobre todo cuando se utiliza en pediatría.

Los capnógrafos modernos aspiran a una velocidad de flujo de 50 a 500 ml min., el cual normalmente no interfiere con el reglaje del ventilador y tal pérdida de los gases respiratorios puede ser fácilmente compensada. Los tubos utilizados para la toma de la muestra tienen un diámetro interno de 1 a 2 mm lo cual permite dar una respuesta rápida utilizando el flujo de aspiración antes mencionado. Estos capnógrafos poseen un sistema de compensación para la presión atmosférica, para el óxido nitroso y para el oxígeno. Los capnógrafos sin sistema de aspiración la medida del CO_2 es directa por medio de una célula incluida dentro del circuito paciente. Pero el peso, el volumen y el precio de tales aparatos son grandes inconvenientes.

Aplicación clínica

En anestesiología se utilizan los siguientes parámetros: la presión inspiratoria de CO_2 ($PICO_2$), la presión de CO_2 al final de la expiración ($PETCO_2$) y la morfología del capnograma.

La interpretación de la $PICO_2$ es muy simple si la medida es correcta (flujo de aspiración, calibración, frecuencia respiratoria, etc.) es decir que si la aguja del capnógrafo o que la curva del capnograma no regresa a cero durante la fase inspiratoria significa que hay que reinhalación del CO_2 expirado.

La interpretación de la $PETCO_2$ es más complicada y para ello explicaré ciertos aspectos importantes.

1. Determinación de una ventilación adecuada.

Durante la anestesia general en respiración espontánea utilizando algún agente volátil, la sensibilidad del centro respiratorio a los estímulos de los quimioreceptores está disminuida, lo que va a permitir un aumento progresivo del CO_2. Esto quiere decir que conforme pasa el tiempo se requiere una $PaCO_2$ más alta para mantener la respiración espontánea. Si ésta anestesia por inhalación se suplementa con cualquier derivado morfínico, la depresión respiratoria será más importante conduciendo a una hipoventilación y a una pobre ventilación alveolar las cuales se pueden evitar con la ventilación artificial. La ventilación artificial se puede llevar a cabo manualmente o con la ayuda de un ventilador para lo cual por lo menos se debería de recurrir a un espirómetro y está influida por el "instinto o experiencia" de cada anestesiólogo aunque existen múltiples nomogramas para determinar la ventilación minuto. Con la capnografía se puede individualizar los requerimientos ventilatorios de cada paciente en la anestesiología de rutina.

Actualmente en nuestro hospital no se practica ninguna anestesia sin la vigilancia de la capnografia y se puede comparar al uso del electrocardiograma. Si una anestesia no se concibe sin el monitoreo minimo de la presión arterial de la frecuencia cardiaca y del ECG llegará el dia en que en todas partes la capnografia formará parte del monitoreo minimo anestésico.

El capnograma normal

El registro del capnograma tiene dos velocidades:

baja → muestra cambios en el nivel del CO_2

Alta → muestra los detalles de cada ciclo respiratorio

Valor normal: 4.5 5.0 vol. % = kP = 35 - 40 mm Hg.

La curva del capnograma se puede comparar al ECG.

P = la fase expiratoria comienza

QR = plateau → salida del flujo alveolar de CO_2

R = la fase expiratoria termina y empieza la inspiración

ST = el resto de la fase inspiratoria.

2. Monitoreo de la capnografia

El monitoreo de la capnografia no solamente nos informa sobre la ventilación del paciente sino que nos aporta información sobre varios parámetros vitales como son: la circulación sistémica y pulmonar, el metabolismo, las vias aéreas, la mecánica respiratoria y la función pulmonar.

El CO_2 producido en los tejidos es transportado hacia los pulmones por la sangre, de esta forma el capnograma es un signo o una senal de "steady state" en donde la producción del CO_2, el sistema de transporte y la eliminación del CO_2 por medio de una ventilación alveolar adecuada, están en equilibrio. Cualquier cambio o interferencia de este "Steady state" es una senal de que algo está sucediendo. La capnografia no da diagnósticos sino que ofrece la posibilidad de vigilar mejor al paciente, de manejarlo mejor y de evitar muchos de los accidentes e incidentes que desgraciadamente todavia suceden en anestesiologia.

- Monitoreo del metabolismo: como se dijo anteriormente la producción y la eliminación del CO_2 están en equilibrio. Pequenos cambios en la producción (V_MCO_2) pueden ser fácilmente manipulados modificando la ventilación alveolar para mantener la $PaCO_2$ deseada. La capnografia es sumamente útil para el diagnóstico de la única enfermedad producida por la anestesia: la hipertermia maligna, la cual se caracteriza por un aumento progresivo del CO_2 expirado que es el primer signo del problema metabólico.

- Monitoreo de la circulación: los problemas cardiocirculatorios que alteren el transporte del CO_2 son rápidamente registrados por la concentración del CO_2 expirado tales como la hipovolemia aguda, la hipotensión arterial el choque cardiogénico o hipovolémico o embolia pulmonar principalmente en neurocirugía.

Monitoreo del circuito respiratorio: la capnografia ayuda para arreglar el ventilador, asi como el flujo de gas fresco. Cuando se utiliza un sistema de reinspiración con absorbedor de CO_2, la capnografia permite por un lado, utilizar flujos bajos de gas fresco y por otro lado vigilar la $FICO_2$, es decir, evitar la reinspiración de CO_2. Además cualquier desconexión del circuito anestésico-paciente se detecta inmediatamente. En el caso de la intubación se puede saber en forma rápida y segura si el tubo está realmente en la traquea, sobre todo cuando es una intubación dificil y finalmente la capnografia nos ayuda a controlar la correcta posición de un tubo endobronquial de doble luz como es el de Robertschaw o el de Carlens.

CONCLUSIONES

Es indiscutible que la capnografia ha sido un gran paso dentro de la seguridad en anestesia, en el sentido en que el CO_2 expirado es el resultado de diferentes procesos (metabólicos, respiratorios y hemodinámicos) y que su monitoreo permite evitar y detectar múltiples accidentes.

Por otro lado hay que tener en mente que la capnografia ($PETCO_2$) no solo depende de las condiciones ventilatorias sino que muchas otras variables a nivel metabólico o hemodinámico van a influenciar el resultado.

Agradecimiento:

Agradezco en forma particular a la Sra. M. Chavaillaz por su colaboración en la transcripción de este artículo.

REFERENCIAS

1. Kevin L S. *Capnography in patients being weaned from mechanical ventilation.* Resp Therapie 1980; 79:83.
2. Leigh D, Jones J, Motley H. *The expired carbon dioxide as a continuous guide of the pulmonary and circulatory systems during anesthesia and surgery.* J Thoracic and Cardiovas Surg 1961; 41: 597-610.
3. Takki S, Aromaa U, Kauste A. *The validity and usefulness of end-tidal pCO_2 during anesthesia.* Ann Clin Res 1972; 4:278-284.
4. Kalenda Z. Smalhout B. *An Atlas of Capnography.* Ed Kerckebosch-Zeist-The Netherlands, 1975.
5. Kalenda Z. *Capnography: a sensitive method for the early detection of air embolism.* Excepta Medica, IVth European Congress of

Anesthesiology. Congress Series No. 330-524, 1974.

6. BURTON G. *THe value of carbon dioxide monitoring during anesthesia.* Anesthesia 1966; 21:173-183.
7. OSBORN J. *Cardiopulmonary monitoring in the respiratory intensive care unit.* Medical Instrumentation 1977; 11:278-282.
8. BOURGAIN J L, BENLABED M, TANDOMET F. *Etude critique de l'intérêt de la capnigraphie en anesthésie.* Ann Fr Anesth Réanim 1987; 6:110-106.
9. SHAFIEHA M J. *End-tidal CO_2 analyzers in proper positioning of the double-lumen tubes.* Anesthesiology 1986; 64:844-845.
10. LINKO K, PALOHEIMO M, TAMMISTO T. *Capnography for detection of accidental oesophageal intubation.* Acta Anesthesiol Scand 1983; 27:199-202.
11. KINSELLA S M. *Assessment of the Hewlett-Packard HP 472104 capnometer.* Br J Anaesth 1985; 57:919-923.
12. PALOHEIMO M, CAZANITIS D. *Kapnometrie in der Anaesthesie und Intensivtherapie.* Anaesthesist 1983; 32:2-5.
13. SCHENA J, THOMPSON J, CRONE R. *Mechanical influences on the capnogram.* Crit Care Med 1984; 12:672-674.
14. PYLES S T. *Expiratory valve dysfunction in a semiclosed circle anesthesia circuit. Verication by analysis of carbon dixode waveform.* Anesth Anal 1984; 63:536-537.
15. MOORTHY S S, ALVIN M L, WILCOX J. *End-tidal PCO_2 greater than $PaCO_2$.* Crit Care Med 1984; 12:534-535.
16. LEPILIN M G. *End-tidal carbon dioxide as a moninvasive monitor of circulatory status during cardiopulmonary resuscitation: a preliminary clinical study.* Crit Car Med 1987; 15:958-959.
17. BADWELL J M. *End-tidal PCO_2 measurements sampled at the distal and proximal ends of the endotracheal tube in infants and children.* Anesth Anal 1987; 66:959-964.
18. HAUSDOERFER J, HAGEMANN H, DIECKHOFF F. *Die Messung des endexpiratorischen Kohlendioxid-Wertes in der Kinderanaesthesie.* Anaesthesist 1986; 35:353-358.