

Capnografía volumétrica durante la anestesia general: Innovando en el monitoreo hemodinámico

Volumetric capnography during general anesthesia: Innovating hemodynamic monitoring

Mario Andrés Villaveces Buelvas^{1,*} , Saul Álvarez Robles¹, Héctor Julio Meléndez Flórez¹

¹ Anestesiología y Reanimación, Universidad Industrial de Santander. Colombia.

Fecha de recepción: 08 de mayo de 2025 / Fecha de aceptación: 16 de julio de 2025

ABSTRACT

Background: Hemodynamic monitoring in noncardiac surgery has undergone a significant evolution from invasive methods to minimally invasive techniques and, more recently, to noninvasive strategies that prioritize patient safety without compromising diagnostic accuracy. Volumetric capnography (VMCO_2) emerges as a reliable tool for the evaluation of the hemodynamic status of the patient under general anesthesia. **Objective:** To determine the degree of correlation between volumetric capnography and hemodynamic status in patients undergoing general anesthesia for non-cardiac surgery. **Methods:** Observational, longitudinal, and analytical study, with a sample of 127 patients, obtaining a total of 1,396 hemodynamic measurements. Correlations between TAS, TAD, TAM and ETCO_2 , VMCO_2 and O_2 consumption (VO_2) were analyzed using Spearman's correlation coefficient (ρ). **Results:** There is a weak positive correlation between hemodynamic variables and volumetric capnography, the highest was observed between TAS and VMCO_2 ($\rho = 0.2347$), while the lowest was between TAM and ETCO_2 ($\rho = 0.0171$), both with statistical significance. Additionally, CO_2 production and energy expenditure were evaluated, obtaining a Spearman coefficient of 1.0, indicating a perfect, positive, and strong correlation between both variables. **Conclusion:** There is a correlation between volumetric capnography and hemodynamic monitoring parameters. Although the correlations are not perfect, the results obtained are sufficiently solid to support the development of new lines of research, focused on the use of standardized techniques that minimize biases and increase the accuracy of measurements, which could have a great impact on diagnostic confidence and clinical decision making by the anesthesiologist in the surgical setting.

Keywords: Volumetric capnography, non cardiac surgery, hemodynamic monitoring.

RESUMEN

Introducción: El monitoreo hemodinámico en cirugía no cardíaca ha experimentado una evolución significativa, desde métodos invasivos hacia técnicas mínimamente invasivas y, más recientemente, hacia estrategias no invasivas que priorizan la seguridad del paciente sin comprometer la precisión diagnóstica. La capnografía volumétrica se perfila como una herramienta confiable para la evaluación del estado hemodinámico del paciente bajo anestesia general. **Objetivo:** Determinar el grado de correlación entre la capnografía volumétrica y el estado hemodinámico de pacientes sometidos a anestesia general para cirugía no cardíaca. **Metodos:** Estudio observacional, longitudinal y analítico, con una muestra de 127 pacientes, obteniéndose un total de 1.396 mediciones hemodinámicas. Se analizaron las correlaciones entre TAS, TAD, TAM y ETCO_2 , VMCO_2 y consumo de O_2 , mediante el coeficiente de correlación de Spearman (ρ). **Resultados:** Existe una correlación positiva débil entre las variables hemodinámicas y la capnografía volumétrica, la más alta se observó entre TAS y VCO_2 ($\rho = 0,3247$), mientras que la más baja se presentó entre TAM y ETCO_2 ($\rho = 0,017$), ambas con significancia estadística. Adicionalmente, se evaluó la producción de CO_2 y el gasto energético, obteniéndose un coeficiente de Spearman de 1,0, lo que indica una correlación perfecta, positiva y fuerte entre ambas variables. **Conclusión:** Existe una correlación entre la capnografía volumétrica y parámetros del monitoreo hemodinámico. Aunque las correlaciones no son perfectas, los resultados obtenidos son suficientemente sólidos para sustentar el desarrollo de nuevas líneas de investigación, enfocadas en el uso de técnicas estandarizadas que minimicen los sesgos y aumenten la precisión de las mediciones, las cuales podrían tener un gran impacto en la confianza diagnóstica y en la toma de decisiones clínicas por parte del anestesiólogo en el entorno quirúrgico.

Palabras clave: Capnografía volumétrica, cirugía no cardíaca, monitoreo hemodinámico.

Mario Andrés Villaveces M.D.

mvb8925@gmail.com

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3061-2134>

ISSN: 0716-4076



Introducción

La capnografía volumétrica ha tenido un papel preponderante durante los últimos años como una gran herramienta para el monitoreo hemodinámico de los pacientes que se encuentran bajo ventilación mecánica invasiva en la unidad de cuidados intensivos, mejorando la vigilancia de alteraciones pulmonares y hemodinámicas importantes, teniendo así un gran impacto en la toma de decisiones para el manejo del paciente crítico. Dado, que en los quirófanos del Hospital Universitario de Santander, en Bucaramanga, Colombia, contamos con máquinas de anestesia DRAGER Primus, que nos permite realizar monitoreo intraoperatorio de capnografía volumétrica a los pacientes bajo anestesia general con ventilación mecánica invasiva, consideramos en el posgrado en Anestesiología y Reanimación de la Universidad Industrial de Santander, que esta herramienta, poco advertida por los anestesiólogos locales, podría constituir una alternativa adicional al monitoreo mínimamente invasivo, y de esta manera impactar en la seguridad del paciente. De otro lado, seguramente nos facilita la toma de decisiones en el intraoperatorio, con respecto al uso de monitoreo hemodinámico invasivo y disminuir la incidencia de las complicaciones asociadas, así como, mitigar los altos costos al sistema de salud, relacionados con el paciente quirúrgico. Para sustentar estos conceptos decidimos desarrollar la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué grado de correlación existe entre el estado hemodinámico y la capnografía volumétrica en los pacientes quirúrgicos adultos bajo anestesia general?

Marco teórico y estado del arte

La capnografía volumétrica (VCO_2), consiste en una representación gráfica de la presión parcial de dióxido de carbono (CO_2) frente al volumen espirado.

La medición se puede realizar de forma no invasiva utilizando una combinación de sensores de flujo y CO_2 , que se conectan juntos en la pieza en Y del circuito del ventilador, esta puede brindar mucha más información que capnografía convencional, principalmente aporta información sobre el metabolismo, la función cardiovascular, la ventilación y la relación ventilación/perfusión[1]. La capnografía volumétrica gracias a la combinación de tecnología avanzada de monitoreo del flujo en las vías respiratorias y volumen corriente permite el cálculo no invasivo a pie de cama, respiración a respiración, de la eliminación de dióxido de carbono por respiración[2], más específicamente la pendiente de la fase III del capnograma espirado trazado como función del volumen corriente espirado; este ha tenido utilidad en la medición del espacio muerto anatómico mediante la extrapolación del aumento de VCO_2 con el volumen exhalado y correlación directa con la hemodinamia del paciente en situaciones específicas[2].

Los cambios en el flujo sanguíneo del capilar pulmonar son proporcionales a los cambios en la capnografía volumétrica[3], de esta manera pueden estar relacionados con el estado hemodinámico del paciente en condiciones en las cuales la producción de CO_2 corporal y la ventilación permanezcan estables, observándose cambios cuando hay variaciones en el gasto car-

díaco y perfusión pulmonar[1].

Por otra parte, con respecto al monitoreo hemodinámico, el flujo de moléculas de CO_2 en la circulación, dependerá de su contenido en sangre (hemoglobina) y del gasto cardíaco, por lo tanto, se debe tener en cuenta que las moléculas de CO_2 llegan a los alvéolos a través de la perfusión pulmonar o del gasto cardíaco del corazón derecho, esto denota una estrecha dependencia entre la eliminación de CO_2 y el flujo sanguíneo pulmonar; este vínculo entre la perfusión pulmonar y la eliminación de CO_2 explica el papel de la capnografía estándar para el diagnóstico de eventos hemodinámicos y para la monitorización de la calidad de las maniobras de RCP, la cual brinda información cualitativa, mientras que la capnografía volumétrica brinda información cuantitativa[4].

Adicionalmente, el monitoreo de la respiración se basa en el principio de que el objetivo principal del sistema respiratorio es el intercambio gaseoso, que depende de la perfusión capilar pulmonar, la difusión y la ventilación. Las enfermedades causantes de aumento en espacio muerto son aquellas que disminuyen la perfusión pulmonar (embolia pulmonar, hipotensión arterial, hipovolemia) pero manteniendo normal o aumentada la ventilación alveolar, en este contexto hay que tener en cuenta que estas patologías podrían ser limitaciones para una correlación adecuada entre la capnografía volumétrica y las variables hemodinámicas del paciente.

La utilidad de la capnografía volumétrica, se basa en la evidencia que ha demostrado su relación con el estado hemodinámico del paciente, desde modelos animales bajo ventilación mecánica en los que se han observado que los cambios en el flujo sanguíneo y la presión de la arteria pulmonar modificaron en gran medida la forma del capnograma volumétrico, además el aumento de las presiones arteriales pulmonares y del gasto cardíaco, condujo a aumentos paralelos de las pendientes de la fase III, así como también gastos cardíacos más bajos dieron lugar a una menor cantidad de CO_2 eliminado durante un ciclo respiratorio[5].

La evidencia en humanos ha demostrado la correlación entre la capnografía y la respuesta a fluidos y ha mostrado mejor rendimiento comparándolo con otros índices utilizados como presión arterial media, presión sistólica y variabilidad de pulso, teniendo las limitaciones propias de las alteraciones pulmonares como alteraciones ventilación/perfusión, ventilatorias como el uso de modos no controlados o cardíacas como arritmias, que alteran dicha relación[6].

Adicionalmente, en nuestra institución esto ha sido objeto de interés en el área de la unidad de cuidados intensivos con el objetivo de correlacionar sus cambios con el estado hemodinámico del paciente, sin embargo, no existen estudios que orienten el uso de la capnografía volumétrica en el quirófano y las posibles implicaciones que puede tener en el monitoreo intraoperatorio del paciente bajo anestesia general[7].

Conociendo las bases fisiológicas y la evidencia que soporan una probable relación entre variables hemodinámicas comúnmente medidas y la capnografía volumétrica, se considera que esta tiene el potencial de ser una alternativa útil, viable y costo efectiva para el monitoreo de los pacientes bajo anestesia general.

Objetivos

Objetivo general

Determinar el grado de correlación entre capnografía volumétrica y estado hemodinámico.

Objetivos específicos

1. Describir las características clínicas y sociodemográficas de la población de estudio.
2. Describir el grado de correlación entre las variables hemodinámicas TAS TAM y la capnografía volumétrica.
3. Describir el grado de correlación entre producción de CO₂ y gasto energético.

Materiales y Métodos

- A. *Tipo de estudio:* Observacional - longitudinal y analítico. Evaluación de tecnología diagnóstica.
- B. *Población blanco:* Pacientes quirúrgicos del Hospital Universitario de Santander.
- B.1 *Población elegible:* Pacientes adultos bajo anestesia general y ventilación mecánica invasiva en modo controlado.
- B.2 *Criterios de inclusión:*
 - Pacientes bajo anestesia general.
 - Pacientes mayores de 18 años.
 - Pacientes que se encuentren bajo ventilación mecánica invasiva con máquina de anestesia dragger primus en salas de cirugía del hospital universitario.

Criterios de exclusión:

- Pacientes con patología pulmonar diagnosticada, neumopatía crónica.
- Pacientes bajo anestesia general, ventilados con volúmenes corrientes mayores a 8 ml/kg de peso ideal.
- Pacientes bajo anestesia general, con intubación selectiva.
- Pacientes con diagnóstico arritmias cardíacas.
- Pacientes con diagnóstico de hipertensión pulmonar.
- *Tamaño muestral:* Tomando en consideración que no existen reportes consistentes en la literatura, la correlación entre la estabilidad hemodinámica y la capnografía volumétrica varía entre el 0,6 y 0,75 y teniendo en cuenta los siguientes parámetros:
 - Correlación a detectar: 0,70.
 - Poder del 80% y una.
 - Confianza del 95%.
- *Tamaño Muestral:* 104 participantes y considerando.
- Perdidas: 15% de perdidas.
- Tota del tamaño muestral = 120 participantes de la investigación.

Aspectos éticos y legales

La presente investigación fue presentada y aprobada por el comité de posgrado de la universidad y el comité de ética de la universidad y del hospital universitario. Fue catalogado como investigación sin riesgo. Debido a que no se propone intervención alguna. Se siguieron los principios éticos como se estipula

en la Declaración de Helsinki, última revisión establecida en el marco de la 64^a Asamblea General de la Asociación Médica Mundial, Fortaleza, Brasil, en octubre de 2013 y lo establecido en el artículo 11 de la Resolución 008430 de 1993 del Ministerio de Salud y lo estipulado en la Ley 1.581 de 2012 sobre protección de datos personales.

Manejo y análisis de datos

Se diseñó un instrumento de recolección de datos, posteriormente se creó una base de datos en Excel y se exportó a Stata para su análisis final. Las variables cualitativas ya sean nominales u ordinales se resumen mediante frecuencias absolutas y frecuencias relativas, para las continuas medidas de tendencia central y de dispersión, si aplica reportamos los IC 95%. Inicialmente se evaluó su distribución con el fin de determinar el coeficiente de correlación a usar. Si presentaban distribución normal se reportó la relación a través del coeficiente de correlación de Pearson en caso contrario utilizamos Spearman. Adicionalmente, se reportó IC 95% cuando hubo necesidad. Un valor de p < 0,05 se consideró para su significancia estadística.

Para la estimación de la correlación en el análisis bivariado se tendrá en cuenta que la variable dependiente será los datos aportados por la capnografía volumétrica y las variables independientes las otras variables hemodinámicas como, tensión arterial sistólica, tensión arterial diastólica, tensión arterial media, CO₂ exspirado, consumo de oxígeno y estabilidad hemodinámica definida como TAS > 90 mmHg para el grupo estable y TAS < 90 mmHg para el grupo inestable (Figura 1).

Resultados

Durante un período de 10 meses en el año 2024, se logró completar la muestra propuesta con 20% superior a la muestra calculada sin pérdidas, llegando a 127 pacientes quienes cumplieron criterios de inclusión y no presentaban exclusión. Para el presente análisis, pudimos obtener 1.396 mediciones hemodinámicas con un promedio de 12 mediciones por paciente y con tiempo promedio del acto anestésico quirúrgico de 100,3 minutos.

Características basales y clínicas de los pacientes

Del total de la muestra, el promedio de edad fue 48,02 años, con predominio del sexo femenino (50,3%), la HTA fue la comorbilidad más frecuente (18,8%) y por estado físico el ASA 1 predominó con 38,58%, la anestesia general balanceada fue la más utilizada (98%). Resto de las características basales y clínicas pueden verse en la Tabla 1.

Correlación entre variables hemodinámicas y monitoreo de capnografía volumétrica

Para el análisis de la correlación entre el estado hemodinámico y la capnografía volumétrica, inicialmente analizamos si estas variables presentaban distribución normal utilizando prueba de Shapiro-Wilk, la cual indicó que las variables TAS, ETCO₂ y VMCO₂ se desviaron significativamente de la normali-

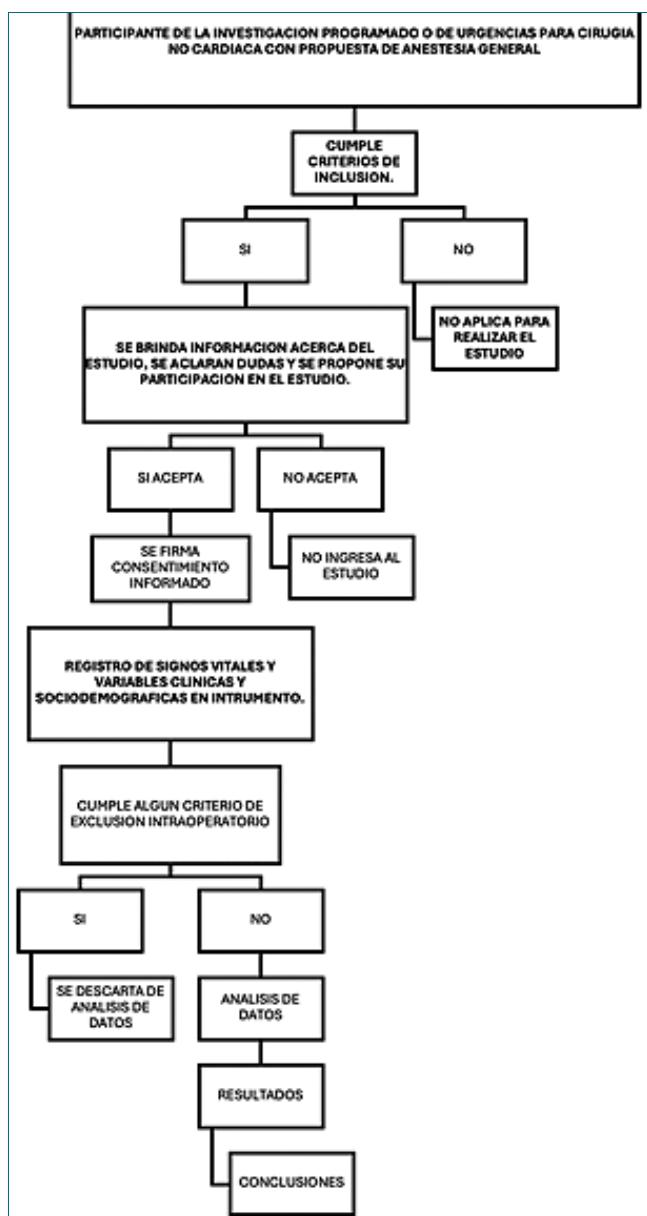


Figura 1.

dad ($W =$ entre 0,93 y 0,99 con valores de $p < 0,005$), por lo que podemos decir que los datos no siguen una distribución normal, por tal motivo evaluaremos la correlación mediante el coeficiente de Spearman. Una medida resumen de cada paciente (promedio) de las diferentes variables aportadas por la capnografía, y obtuvimos los siguientes resultados (Tabla 2).

Análisis de correlación

Para evaluar la correlación entre los valores de variables hemodinámicas aportadas por la capnografía volumétrica y "estabilidad hemodinámica", nosotros realizamos una clasificación de la variable según valores de TAS menor de 90 (inestable) y mayor o igual a 90 mmHg, al realizar la evaluación de correlación de las variables TAS con $ETCO_2$, $VMCO_2$ y consumo O_2 .

Tabla 1. Características clínicas y sociodemográficas		
Variable	Promedio (DS)	Min - Max
Edad (años)	48,02 (17,14)	19 - 87
Tiempo Qx (Minutos)		
	No	Fr
Sexo		
Hombre	63	49,60%
Mujer	64	50,30%
Comorbilidad		
HTA	24	18,8%
DM	14	11,02%
Neumopatía	18	14,16%
Tiroïdes	12	9,44%
Cáncer	8	6,29%
Enf. coronaria	3	2,36%
Enf. renal crónica	2	1,57%
Convulsiones	2	1,57%
Otros	10	7,87%
Clasificación de la Cx		
Menor	61	48,03%
Mayor	47	37,00%
Compleja	19	14,90%
Clasificación ASA		
ASA 1	49	38,58%
ASA 2	46	36,22%
ASA 3	29	22,83%
ASA 4	3	2,36%
Tipo de anestesia		
Gral. balanceada	125	98,40%
TIVA	2	1,60%
Total	127	100,00%

DS: (desviación estándar); HTA: (hipertensión arterial); DM: (diabetes mellitus); TIVA: (anestesia total intravenosa).

en los grupos de pacientes estables e inestables. Este análisis de correlación mediante el coeficiente de Spearman (Srho) nos aportó valores Srho positivos, consecuentes con relación positiva débil, entre cada una de las variables y el monitoreo. Vale resaltar que la correlaciones entre el grupo de estables e inestables fue mayor para la relación TAS/ $ETCO_2$ en paciente inestable y con $VMCO_2$ para el estable, pero sin diferencias entre los dos grupos (Tabla 3).

Adicionalmente, la correlación de los valores de TAS, TAD, TAM con las variables del monitoreo capnografía fue más alta para $VMCO_2$ con un coeficiente de correlación de 0,3247 y menor correlación para TAM y $ETCO_2$ con un Srho de 0,017. A pesar de estos valores la correlación siempre fue positiva y significativa. Hallazgo que será motivo de discusión (Tabla 3 y Gráfico1).

Tabla 2. Variables hemodinámicas y monitoreo de capnografía volumétrica

Variable	Promedio	Desv. Stand.	Min - Max	Shapiro Wilk*	Valor p*
TAS	101,99	19,13	53 -215	0,93793	0,00000
TAD	59,92	12,77	21-117	0,98088	0,00000
TAM	76,4	13,65	31-141	0,98231	0,00000
ETCO ₂	34,4	4,06	16-85	0,93202	0,00000
VMCO ₂	282,86	62,45	30-487	0,99642	0,00250
VO ₂	357,65	91,73	34-950	0,95613	0,00000
VT	427,54	62,31	106-753	0,97640	0,00230

*Prueba de normalidad (w); TAS: (tensión arterial sistólica); TAD: (tensión arterial diastólica); ETCO₂: (dióxido de carbono espirado); VMCO₂: (capnografía volumétrica); VO₂: (consumo de oxígeno); TAM: (tensión arterial media); VT: (volumen tidal).

Tabla 3. Correlación entre capnografía volumétrica y estado hemodinámico

		Coefficiente Spearman rho	Valor p
TAS mmHg	ETCO ₂	0,1697	0,000
	VMCO ₂	0,2347	0,000
	Consumo O ₂	0,1799	0,000
TAM mmHg	ETCO ₂	0,0171	0,000
	VMCO ₂	0,1747	0,000
	Consumo O ₂	0,1381	0,000
Grupo estable TAS > = 90 mmHg 74,86%	ETCO ₂	0,116	0,0002
	VMCO ₂	0,198	0,000
	Consumo O ₂	0,1378	0,000
Grupo inestable TAS < 90 mmHg 25,14%	ETCO ₂	0,159	0,0028
	VMCO ₂	0,1525	0,0042
	Consumo O ₂	0,1395	0,009

TAS: (tensión arterial sistólica); ETCO₂: (dióxido de carbono espirado); VMCO₂: (capnografía volumétrica); TAM: (tensión arterial media).

Correlación entre producción de CO₂ y gasto energético

Para cumplir nuestro último objetivo y evaluar la relación entre producción de CO₂ y gasto energético, primero realizamos medidas resumen para cada paciente, pues el requerimiento energético se debe individualizar. Adicionalmente, utilizamos la ecuación de Weir simplificada, que relaciona el VCO₂ (producción de CO₂ en mL/min) con el gasto energético (kcal/día)[10] y asumimos cociente respiratorio de 0,7.

Gasto calórico (kcal/día) = (3,94 × VCO₂(mL/min) + 1,11 × VO₂ (mL/min)) × 1,44 calorías diarias = 6,63 * VMCO₂ (ml/min)

Kcal = (3,94 * VCO₂ promedio * 1,44) / RQ (cociente respiratorio).

Obtuvimos una media de calorías-día de 1.860 con un DS de 367,41, las mediciones de calorías-día y kilocalorías promediadas se muestran en la Tabla 4.

Finalmente, la correlación de esta relación fue muy positiva y perfecta con valores de coeficientes de 1, como podemos observar al graficar un diagrama de dispersión (scatter plot) con una línea de tendencia lineal (lfit) visualizando más objetivamente la relación entre dos variables y confirmando el coeficiente de Spearman de 1,0, concordante con una correlación

fuerte y positiva, la tendencia de datos de capnografía volumétrica vs calorías día se muestra en el Gráfico 2.

Adicionalmente, se evaluó la correlación entre el gasto energético calórico estimado mediante la fórmula de Weir y diversas fórmulas abreviadas que lo calculan exclusivamente a partir de la producción de dióxido de carbono (VCO₂) y constantes derivadas de diferentes cocientes respiratorios. Estas fórmulas simplificadas se basan en la relación entre la producción de CO₂ y el gasto energético, asumiendo un cociente respiratorio (RQ) específico que permite simplificar la ecuación original de Weir[13]. El RQ, definido como la relación entre la producción de CO₂ y el consumo de oxígeno, sustenta la premisa de que la producción de CO₂ está directamente relacionada con el gasto energético. En este contexto, la constante utilizada en dichas fórmulas refleja dicha relación de manera estimativa.

Fórmulas abreviadas:

VCO₂ es la producción de CO₂ en litros por minuto.

$$1. \text{ Kcal} = \text{VCO}_2 (\text{L}/\text{min}) \times 5,52$$

$$2. \text{ Kcal} = \text{VO}_2 (\text{L}/\text{min}) \times 4,83 \text{ (asumiendo un RQ de 0,85)}$$

$$3. \text{ Kcal} = \text{VCO}_2 (\text{L}/\text{min}) \times 5,04 \text{ (asumiendo un RQ de 0,80)}$$

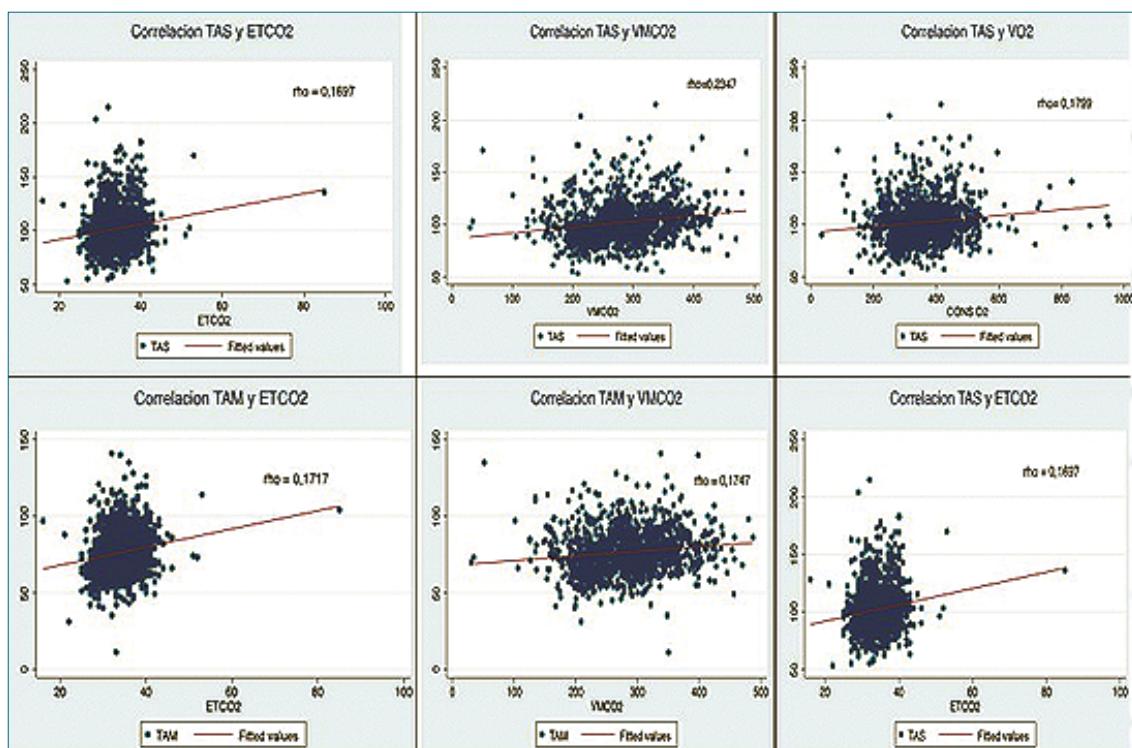


Gráfico 1. Gráfico de correlación: Capnografía volumétrica y variables hemodinámicas. TAS: (tensión arterial sistólica); ETCO₂: (dióxido de carbono espirado); VMCO₂: (capnografía volumétrica); VO₂: (consumo de oxígeno); TAM: (tensión arterial media).

Tabla 4. Requerimiento calórico según capnografía volumétrica

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Calorías día	127	1860437	367.4133	1040468	2772287
Kcal	127	2274376	449161	1271967	3389108

Kcal (kilocalorías).

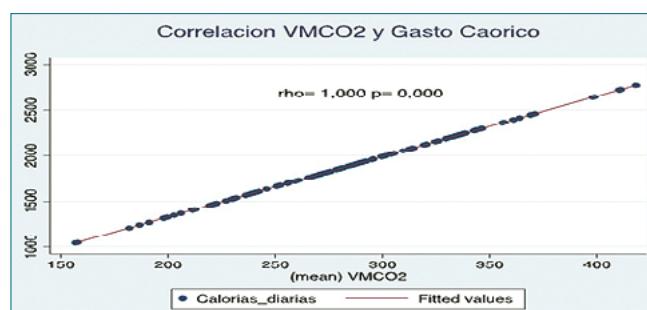


Gráfico 2. Correlación VMCO₂ y gasto calórico. VMCO₂ (capnografía volumétrica).

Los valores promedio de gasto energético que se calcularon se muestran en la Tabla 5, así mismo se pudo establecer que todos los valores mostraban una distribución normal (Tabla 6).

Dado que la prueba de normalidad aplicada al "gold estándar" (fórmula de Weir) no mostró una evidencia concluyente de normalidad ($p = 0,0886$) (Tabla 6), y aunque el valor de p es mayor a 0,05, se optó por utilizar pruebas no paramétricas,

como el coeficiente de correlación de Spearman, para evaluar la relación entre los valores estimados por cada fórmula abreviada y los obtenidos mediante la fórmula de Weir. Los coeficientes de correlación obtenidos fueron idénticos para todas las fórmulas abreviadas en relación con la fórmula de Weir ($\rho = 0,9617$) (Gráfico 3), lo cual sugiere una fuerte relación entre ellas. Esta alta concordancia podría deberse a el hecho de que las fórmulas simplificadas derivan unas de otras mediante transformaciones lineales, manteniendo estructuras matemáticas muy similares (por ejemplo: Fórmula 2 $\approx a + b \times$ Fórmula 1). Esta hipótesis se evaluó mediante análisis de regresión lineal, obteniéndose un coeficiente de determinación $R^2 > 0,99$, lo cual confirma que las fórmulas presentan prácticamente la misma estructura lineal.

Discusión y Conclusiones

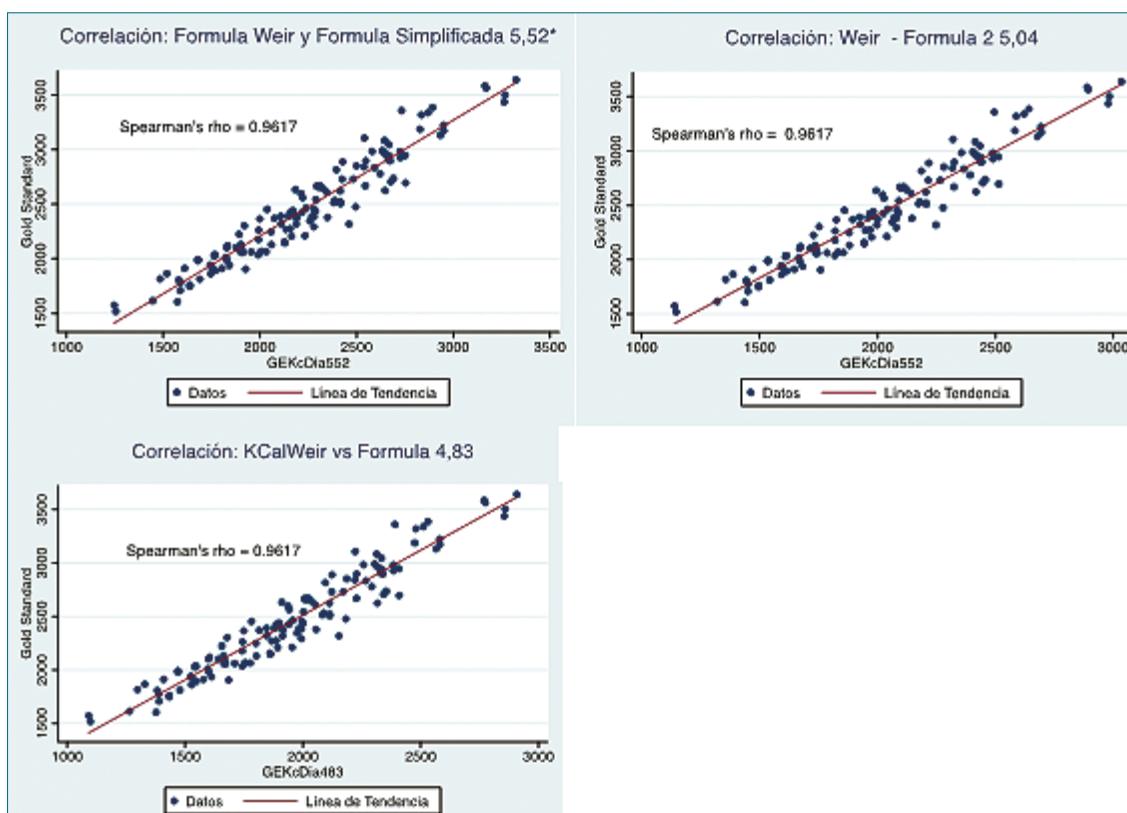
En este estudio observacional y analítico, en el que se evaluó la correlación entre el estado hemodinámico y capnografía volumétrica, mediante el coeficiente de Spearman, encontramos una relación débil pero positiva y estadísticamente significativa,

Tabla 5. Valores promedio de gasto energético

	Promedio	Mediana	Desv. Estándar	Min- Max	
Formula Weir	2454.412	2389,5	486.3738	1516.972 - 3640.483	-
Formula 1	2230.504	2216,9	440.497	1247.432 - 3323.734	-
Formula 2	1951.691	1939,8	385.4349	1091.503 - 2908.267	-
Formula 3	2036.547	2024,2	402.1929	1138.959 - 3034.714	-

Tabla 6. Valores de normalidad

	Skewness	Kurtosis	Prob χ^2
Kcal/día según Weir	0.0668	0.2272	0.0886
Formula (1) Kte 5,52	0.3526	0.4190	0.4620
Formula (2) Kte 4,83	0.3526	0.4190	0.4620
Formula (3) Kte 5,04	0.3526	0.4190	0.4620

**Gráfico 3.** Correlación entre fórmulas abreviadas y fórmulas de Weir. GEKcDIA (gasto energético en kilocalorías por día).

este hallazgo no está soportado en pacientes en cirugía no cardíaca como si lo ha reportado, Ingrid Elise Hoff et al., en cirugía cardíaca, donde se evidenciaron cambios significativos de la capnografía volumétrica en situaciones de inestabilidad hemodinámica, sugiriendo mayor sensibilidad de la capnografía volumétrica para inestabilidad hemodinámica cuando se compara con la capnografía convencional[11], así mismo encontramos una relación débil pero positiva y estadísticamente significativa, mediante el coeficiente de correlación de Spearman entre va-

riables hemodinámicas como TAS y TAM y TAD y la capnografía volumétrica y consumo de oxígeno, lo cual está en concordancia con lo que encontraron Verschueren et al., la capnografía volumétrica predijo disminución del gasto cardíaco con aumento de la PEEP durante cirugía cardíaca, lo que sugiere una clara relación de las variables hemodinámica con la capnografía volumétrica[12], esto puede ser de utilidad clínica en el contexto de paciente crítico bajo anestesia. Adicionalmente, K. Lakhali et al., encontraron que el ETCO₂ tiene un rendimiento similar a

la Variabilidad de Presión de Pulso (VPP) y Variabilidad del Volumen Sistólico (VVS), en pacientes bajo ventilación mecánica controlada que fueron sometidos a cargas de volumen, en la unidad de cuidado intensivo[6], así mismo Álvarez, S. & Serrano R., encontraron concordancia entre la capnografía volumétrica y métodos de medición del gasto cardíaco como la biorreactancia torácica[7]. lo que nos motiva a plantear un nuevo estudio enfocado en el paciente inestable durante el intraoperatorio.

Toda esta evidencia soporta nuestra hipótesis de que la capnografía volumétrica en el paciente bajo anestesia general puede ser una alternativa viable de monitoreo hemodinámico no invasivo. Por último, al evaluar la correlación entre la capnografía volumétrica y el gasto energético hemos encontrado que el gasto calórico y la capnografía volumétrica tiene una relación directa, fuerte y estadísticamente significativa entre ellas, con un rho de Spearman de 1 que sugiere una muy buena consistencia en los resultado, de la misma manera como Abel Salvador Arroyo- Sánchez encontraron que la calorimetría indirecta calculada mediante el consumo de oxígeno y la capnografía volumétrica tiene utilidad clínica en la medición del gasto energético en las unidades de cuidado intensivo[10].

Adicionalmente, es importante tener en cuenta, que las fórmulas de gasto energético simplificadas presentan limitaciones, por lo tanto, no tienen la precisión de la ecuación original de Weir. Su exactitud depende en gran medida de las mediciones de VO_2 y VCO_2 , así como también de la validez de las suposiciones realizadas sobre el cociente respiratorio (RQ)[13]. Los valores idénticos del coeficiente de correlación de Spearman entre las fórmulas abreviadas y la fórmula de Weir pueden deberse a que todas las fórmulas simplificadas tienen en común el mismo parámetro dominante (VO_2 o VCO_2), y utilizan coeficientes similares. Como resultado, se obtienen patrones de correlación prácticamente idénticos con el estándar de referencia. Lo cual sugiere que las variables están altamente correlacionadas; es decir, una puede expresarse como una transformación lineal exacta de las otras. En la práctica, este tipo de relación tan estrecha es poco común y refuerza la idea de que las fórmulas comparten una estructura matemática muy similar, o incluso que algunas fueron derivadas directamente unas de otras.

Por lo tanto, en el ámbito quirúrgico consideramos que la relación de la capnografía volumétrica con el gasto energético, puede tener gran importancia principalmente en pacientes hiperdinámicos, como los sépticos con metabolismo elevado.

Nuestra investigación a pesar de tener debilidades dado la evidencia para este tipo de estudios, nos fortalecemos al ser el primer estudio en Latinoamérica que evalúa el uso de capnografía volumétrica como monitoreo hemodinámico, y nos permite avanzar en el monitoreo hemodinámico de los pacientes bajo anestesia general, al contar hoy en día con máquinas de anestesia que permiten monitorizar mínimamente invasivo la hemodinamia de pacientes bajo anestesia general. Así, consideramos que hemos iniciado la optimización del uso de la máquina de anestesia en monitoreo lo cual repercutirá en la seguridad del paciente, sugerimos continuar con esta línea de investigación mediante trabajos comparativos que nos permitan evaluar su eficacia y seguridad.

Finalmente, podemos concluir que nuestra pregunta de investigación se respondió y se comprobó que existe correlación entre el monitoreo hemodinámico y capnografía volumétrico, sin encontrar correlaciones perfectas, nos permiten abrir el

campo de la investigación y poder diseñar en un futuro cercano nuevas investigaciones, con técnicas estandarizadas de medición, que minimicen los sesgos y podamos tener mejores correlaciones (como las obtenidas con el gasto energético), que repercutirá en mayor confianza y seguridad para el anestesiólogo.

Referencias

1. Jean-Michel Arnal, Senior Intensivist, Ste Musse Hospital, Toulon, France, Reviewer: David Grooms., 23/04/2019, Applied physiology at the bedside: Volumetric capnography.
2. Blanch L, Romero PV, Lucangelo U. Volumetric capnography in the mechanically ventilated patient. Minerva Anestesiol. 2006 Jun;72(6):577–85. PMID:16682932
3. Young A, Marik PE, Sibole S, Grooms D, Levitov A. Changes in end-tidal carbon dioxide and volumetric carbon dioxide as predictors of volume responsiveness in hemodynamically unstable patients. J Cardiothorac Vasc Anesth. 2013 Aug;27(4):681–4. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2012.09.025> PMID:23182383
4. Kremeyer P, Böhm SH, Tusman G. Clinical use of volumetric capnography in mechanically ventilated patients. J Clin Monit Comput. 2020 Feb;34(1):7–16. <https://doi.org/10.1007/s10877-019-00325-9> PMID:31152285
5. Mosing M, Kutter AP, Iff S, Raszplewicz J, Mauch J, Bohm SH, et al. The effects of cardiac output and pulmonary arterial hypertension on volumetric capnography derived-variables during normoxia and hypoxia. J Clin Monit Comput. 2015 Feb;29(1):187–96. <https://doi.org/10.1007/s10877-014-9588-0> PMID:24908108
6. Lakhal K, Nay MA, Kamel T, Lortat-Jacob B, Ehrmann S, Rozec B, et al. Change in end-tidal carbon dioxide outperforms other surrogates for change cardiac output during fluid challenge. J Clin Monit Comput. 2015 Feb;29(1):187–96. <https://doi.org/10.1007/s10877-014-9588-0> PMID:24908108
7. Álvarez S, Serrano R. (2019). "Concordancia entre capnografía volumétrica y biorrectancia en medición de gasto cardíaco en pacientes en choque séptico sometidos a carga volumétrica". <http://hdl.handle.net/20.500.12749/7059>
8. John W. Kreit, Division of Pulmonary, Allergy, and Critical Care Medicine, University of Pittsburgh School of Medicine, Pittsburgh, Pennsylvania Volume Capnography in the Intensive Care Unit: Physiological, Principles, Measurements, and Calculations. Ann Am Thorac Soc. 2019 Mar;16(3):291–300. <https://doi.org/10.1513/AnnalsATS.201807-501CM> PMID:30657700
9. Boulos S, Nassar MD, MPH, FCCP*, Gregory A. Schmidt, MD, FCCPb, Capnography for Monitoring of the Critically Ill Patient. Clin Chest Med. 2022;43(3):393–400. <https://doi.org/10.1016/j.ccm.2022.04.002>.
10. Abel Salvador Arroyo-Sánchez1*, Calorimetría indirecta en cuidado crítico: una revisión narrativa Indirect calorimetry in critical care: A narrative review, Revista Chilena de Medicina Intensiva, Volumen 34 – Número 3, <https://doi.org/10.35454/rncm.v3n2.88>.
11. Ingrid Elise Hoff, 1,2 Lars Øivind Høiseth, 2,3 Knut Arvid Kirkebøen, 2,4 and Svein Aslak Landsverk 2, Volumetric and End-Tidal Capnography for the Detection of Cardiac Output Changes in Mechanically Ventilated Patients Early after Open Heart Surgery, Critical Care Research and Practice Volume 2019, Article ID 6393649, 9 pages <https://doi.org/10.1155/2019/6393649>.

12. Verschueren S, Massion PB, Verschuren F, Damas P, Magder S. Sara Verschueren^{1,2}, Paul B. Massion², Franck Verschuren³, Pierre Damas² and Sheldon Magder^{1*}, Volumetric capnography: lessons from the past and current clinical applications. Crit Care. 2016;20(1):184. <https://doi.org/10.1186/s13054-016-1377-3>.
13. Mehta NM, Smallwood CD, Joosten KF, Hulst JM, Tasker RC, Duggan CP. Accuracy of a simplified equation for energy expenditure based on bedside volumetric carbon dioxide elimination measurement—a two-center study. Clin Nutr. 2015 Feb;34(1):151–5. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2014.02.008> PMID:24636151