

Monitoreo hemodinámico no invasivo en anestesiología

Dr. Raúl Carrillo-Esper,* Dr. Martín de Jesús Sánchez-Zúñiga**

* Academia Nacional de Medicina. Academia Mexicana de Cirugía. Jefe de UTI de la Fundación Clínica Médica Sur.

** Médico Cirujano, Especialista en Medicina Interna y Medicina del Enfermo Adulto en Estado Crítico. Adscrito a la Unidad de Terapia Intensiva de la Fundación Clínica Médica Sur y a la Unidad de Terapia Intensiva del Hospital Dr. Enrique Cabrera del GDF. Médico de Base del Servicio de Urgencias del Hospital General de México.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo durante los procedimientos anestésicos es una arma diagnóstica de acceso rápido que nos permite prevenir, hacer diagnóstico temprano y dar un tratamiento oportuno. Dependiendo de la valoración preoperatoria de los factores de riesgo, enfermedades de base y sus complicaciones, se preferirá un monitoreo invasivo o no invasivo.

Las metas que buscamos en el monitoreo no invasivo están enfocadas principalmente a la detección temprana de anomalías y factores de riesgo para establecer una guía de tratamiento para su corrección temprana y mejorar el resultado y pronóstico de los pacientes.

La primera meta del monitoreo no invasivo es asegurar de manera indirecta, una adecuada perfusión, a través de la medición de las constantes corporales (Presión arterial, frecuencia cardíaca, temperatura, frecuencia respiratoria). La detección temprana es particularmente importante para distinguir entre pacientes que requieren sólo de monitoreo y aquellos que necesitan una intervención activa (monitoreo invasivo), y que facilita una terapéutica específica.

El monitoreo de los pacientes en las décadas pasadas estaba restringido a medir las variables fisiológicas que comprendían comúnmente la frecuencia cardíaca, frecuencia respiratoria, presión arterial, temperatura corporal, etcétera, pero con el desarrollo tecnológico en medicina se han incorporado nuevos dispositivos que permiten tener herramientas diagnósticas y terapéuticas que impactan en el abordaje y manejo de los enfermos.

PRESIÓN VENOSA CENTRAL

La presión venosa central (PVC), es una expresión numérica que representa la presión de la aurícula derecha e indirectamente la presión de llenado del ventrículo ipsilateral. Es un

marcador indirecto de volumen intravascular que tradicionalmente se ha utilizado como índice de hidratación y de la función contráctil del ventrículo derecho (Infarto agudo del miocardio del ventrículo derecho). La PVC es el resultado de la interacción del retorno venoso hacia la aurícula derecha y la presión de llenado del ventrículo derecho. Ambos parámetros dependientes de la presión abdominal, pulmonar, del tono vasomotor y volumen sanguíneo. Sus rangos de normalidad son de -2 cm H₂O en inspiración a $+4$ cm H₂O en espiración, con un rango de seguridad hasta de 12 cm H₂O y deberán de tomarse con cautela en conjunto con otros parámetros clínicos con valores por arriba de 10 cmH₂O cuando sus determinantes se encuentran alterados⁽¹⁻³⁾.

La PVC se ha usado durante muchos años como un índice de volumen sanguíneo; lamentablemente la validez de esta medida ha sido puesta en duda en numerosos estudios clínicos. Aunque la PVC alta sugiere aumento del volumen circulante efectivo, puede ser un valor erróneo y realmente tener un bajo volumen de llenado ventricular. El ejemplo clásico se demuestra en el infarto del ventrículo derecho, en donde la PVC será alta, por la falla contráctil del miocardio a pesar de existir hipovolemia (Cuadro I).

La medición de la PVC se usaba para monitorizar la estabilidad hemodinámica en los pacientes que se sometían a ventilación mecánica y que requerían presión positiva al final de la espiración (PEEP). No obstante se ha demostrado que las mediciones de PVC no reflejaban la verdadera función de bomba, el volumen intravascular, y que eran inconstantes con niveles de PVC por arriba de 10 cm H₂O⁽¹⁻³⁾ (Cuadro II).

SATURACIÓN VENOSA MIXTA O SATURACIÓN VENOSA CENTRAL (SVO₂)

En los últimos años se han realizado diferentes estudios clínicos aleatorios, que han demostrado que la utilización

Cuadro I. Factores que alteran la PVC.

Volumen sanguíneo

- Hipovolemia
- Hipervolemia

Tono vasomotor

- Vasoconstricción
- Administración de vasopresores

Aumento de presión intratorácica

- Síndrome de vena cava superior
- Neumotórax

Aumento de la presión intraabdominal

- Ascitis
- Síndrome de hipertensión abdominal
- Sepsis de origen abdominal

Alteración de la bomba

- Embolia pulmonar
- Taponamiento pericárdico
- Pericarditis restrictiva
- *Cor pulmonale*
- Insuficiencia cardíaca

de catéteres pulmonares no ha logrado obtener ventajas sobre la monitorización convencional (hay excepciones citadas anteriormente), por lo cual la monitorización con catéter de arteria pulmonar está en desuso y se ha sustituido por la medición de la saturación mixta venosa de O₂ (SvO₂), que se obtiene al determinar la saturación de la sangre obtenida en la arteria pulmonar. No obstante debido a la necesidad de un dispositivo para la toma de muestra de la arteria pulmonar, se han realizado varios estudios que han demostrado que existe una relación entre la tendencia de la SvO₂ y la saturación venosa central (obtenida de sangre en la vena cava superior), por lo cual esta última es un buen parámetro

Cuadro II. Indicaciones de la medición de la PVC.

Control de la infusión de líquidos en pacientes graves y no graves

Apoyo en el diagnóstico diferencial y decisiones terapéuticas

Monitoreo de la función cardíaca

Estabilidad hemodinámica secundaria a ventilación mecánica

Cuadro III. Interpretación clínica de la PVC.

Estado fisiopatológico	PVC baja	PVC alta
Alteraciones del volumen sanguíneo	<ul style="list-style-type: none"> • Hipovolemia • Deshidratación • Sangrado 	<ul style="list-style-type: none"> • Hipervolemia • Restitución rápida de líquidos
Cambios de la presión intratorácica	<ul style="list-style-type: none"> • Maniobra de Rivero Carballo 	<ul style="list-style-type: none"> • Neumotórax • Hemotórax • EPOC • Asma • Ventilación mecánica con PEEP, SP, PS • Síndrome de vena cava superior • Maniobra de Valsalva
Cambios en la presión intraabdominal	<ul style="list-style-type: none"> • Síndrome de hipertensión abdominal • Abdomen agudo • Ascitis • Hipertensión portal • Síndrome de vena cava inferior 	
Alteraciones en la bomba cardíaca		<ul style="list-style-type: none"> • Insuficiencia ventricular derecha • Taponamiento cardíaco • Insuficiencia o estenosis tricuspídea • Pericarditis • <i>Cor pulmonale</i> agudo • IAM derecho
Cambios en el tono vasomotor	<ul style="list-style-type: none"> • Colapso circulatorio • Sepsis • Choque séptico • Choque anafiláctico • Choque medular 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de vasopresores a altas dosis

PEEP: Presión positiva al final de la espiración; CP: Control presión; PS: Presión soporte. IAM: Infarto agudo del miocardio

equivalente de reanimación, tal como lo demostró el grupo de Rivers en el manejo de la sepsis, que manteniendo una SvO_2 arriba del 70%, además de otras variables disminuía la mortalidad en un 15%⁽⁴⁻⁷⁾.

El valor normal de la SvO_2 refleja un equilibrio entre el aporte (DO_2) y consumo de O_2 (VO_2) de oxígeno, y su valor normal alrededor del 75%. Normalmente el VO_2 es independiente del DO_2 , ya que se puede incrementar la extracción cuando la DO_2 disminuye, cuando se llega al límite de la relación se presenta disminución de la SvO_2 , con niveles de SvO_2 entre 55 y 70% indica que hay compensación de la relación, pero con niveles de entre 50 y 30%, ya no existe esta compensación y el metabolismo anaerobio precipita la acidosis láctica por la grave hipoperfusión tisular.

Recientemente se han desarrollado tecnologías que permiten el monitoreo continuo del volumen latido a base de la diferencia de pulso de un catéter arterial, determinando la $ScvO_2$ y el gasto cardíaco probable de manera continua. Este sistema de monitorización se conoce comercialmente como Vigileo.

ULTRASONIDO DOPPLER TRANSCRANEAL (DT)

El DT es una herramienta que permite detectar estenosis u oclusión de arterias intracraneales, monitorizar la evolución

de los enfermos que presentan vasoespasmos tras una hemorragia subaracnoidea, detectar embolismos cerebrales, predecir eventos isquémicos, evaluar el sistema vascular intracerebral, determinar muerte cerebral. Mediante este dispositivo es posible evaluar la arteria cerebral media (ACM), arteria cerebral anterior (ACA), arteria cerebral posterior (ACP), arteria cerebral distal interna (ACdI), arteria basilar (AB), arteria vertebral (AV), arteria carótida interna extracraneal (ACIe), arteria oftálmica (AO) y el sifón carotídeo. La información de estas arterias se observa a través de las ventanas acústicas del cráneo que comprenden la ventana transtemporal, la ventana transorbitaria, la ventana suboccipital y la ventana submandibular, las cuales permiten insonar determinadas arterias de acuerdo a la ventana de la que se esté accediendo^(8,9) (Figura 1).

El flujo sanguíneo actúa como un reflector recibiendo la transmisión de la onda desde el transductor y después enviando la señal de regreso al transductor. El flujo sanguíneo a través de un vaso depende de la velocidad del movimiento del componente sanguíneo y el diámetro de dicho vaso, entonces a un determinado flujo sanguíneo, la velocidad se incrementa a medida que el diámetro del vaso se estrecha. La velocidad de flujo medio (VFm) es el promedio de las velocidades de flujo a través de un vaso y el valor normal

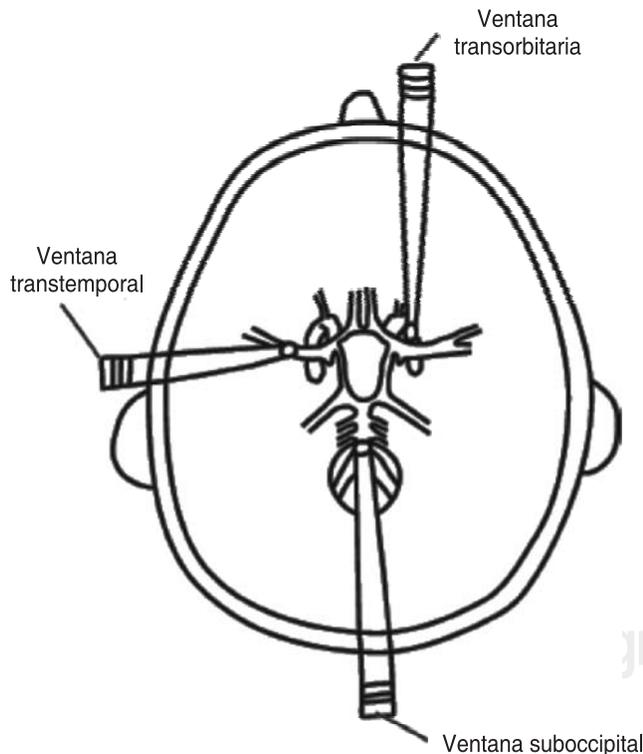


Figura 1. Ventanas del ultrasonido Doppler transcraneal y su relación con las arterias intracraneales.

Cuadro IV. Indicadores hemodinámicos de utilidad del catéter de arteria pulmonar.

Monitoreo hemodinámico	
• Gasto cardíaco	
• Índice cardíaco	
• Resistencias vasculares	
• Medición de presiones auriculares derechas	
Monitoreo de la función vascular pulmonar	
• Presiones de arteria pulmonar	
• Presión capilar pulmonar	
Medición de oximetría de sangre de arteria pulmonar	
• Consumo de oxígeno	
• Transporte de oxígeno	
• Disponibilidad de oxígeno	
Sitio	Presión (mmHg)
Media aurícula derecha	0-7
Ventrículo derecho	
• Sistólica	15-25
• Diastólica final	0-8
Arteria pulmonar	
• Sistólica	15-25
• Diastólica	8-15
• Media	10-20

Presión enclavamiento

oscila entre 55 ± 12 cm, el cual se correlaciona con el FSC. Al insonar la velocidad de flujo de un determinado vaso, se inscriben el pico sistólico y el flujo diastólico en cada ciclo cardíaco, formando la onda de pulsatilidad. En condiciones normales la onda de pulsatilidad refleja la resistencia cerebrovascular, la cual es calculada por el índice de pulsatilidad (IP o índice de Gosling): $IP = (VF_{sistólica} - VF_{diastólica}) / VF_m$. Los rangos normales del IP varían entre 0.6 a 1.1. Otro índice que puede estimar la resistencia vascular es el índice de resistencia o índice de Pourcelot: $IR = (VF_{sistólica} - VF_{diastólica}) / VF_{sistólica}$ ⁽¹⁰⁾ (Cuadro V).

El DT tiene la ventaja de ser un método no invasivo en el monitoreo de los enfermos con lesión encefálica aguda el cual tiene un costo relativo bajo que permite evaluar continuamente la dinámica cerebral de los enfermos neurocríticos en condiciones como el vasoespasmo secundario a hemorragia subaracnoidea, la evaluación de la autorregulación cerebral y reactividad vascular, parámetro que se ha considerado útil en el monitoreo de los pacientes con trauma craneal grave y que está asociado con mal pronóstico, así como en el monitoreo en conjunto con la presión intracraneal y la SvjO₂ ya que permite estimar de manera no invasiva la presión de perfusión cerebral mediante la FVm de la ACM y la presión arterial, con una diferencia de 13 mmHg menos que la PPC real (PAM-PIC)⁽¹¹⁻¹⁵⁾.

OXIMETRÍA

La oximetría básicamente es la interpretación de la coloración sanguínea que depende de la saturación de oxígeno (SaO₂). El cambio de color de la sangre al saturarse de oxígeno, es debido a las propiedades ópticas de la molécula de hemoglobina, el oxímetro de pulso mide la absorción de luz de longitudes de onda específicas que dependerá de la proporción existente entre la hemoglobina oxigenada (espectro rojo) y hemoglobina desoxigenada (espectro azul). Todas las técnicas de oximetría se basan en principios espectrofotométricos que miden las porciones de luz trans-

mitida y/o absorbida por parte de la hemoglobina. Estas técnicas oximétricas son tanto invasivas como no invasivas y se pueden dividir en: 1) Espectrofotometría que analiza la hemoglobina *in vitro*; 2) Oximetría de pulso (SpO₂) para medición no invasiva de la saturación y 3) Oximetría fibroscópica para medición invasiva de la saturación de la oxihemoglobina *in vivo*.

CAPNOGRAFÍA POR ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

La espectroscopía infrarroja es la medición de la energía absorbida de una estrecha banda de longitud de onda de luz infrarroja al hacerla pasar a través de una muestra de gas. El CO₂ absorbe fuertemente la luz comprendida dentro de una longitud de onda de 4.28 micrómetros. Un capnograma es una representación gráfica generada por la exposición continua de la concentración de CO₂ en las vías aéreas del paciente en función del tiempo, se identifican cuatro fases de capnograma; la fase 1 es una línea basal que corresponde a la inspiración; la fase 2 representa el inicio de la espiración graficando la baja tensión de CO₂ en la salida del gas que corresponde al espacio muerto anatómico, y el aumento del CO₂ a medida que el gas exhalado comienza a estar compuesto por cantidades crecientes de gas alveolar; la fase 3 representa la meseta en la salida del CO₂, al final de la cual, normalmente se alcanza el punto más alto y que corresponderá a la lectura capnométrica del CO_{2ET} (CO₂ al final de la espiración), y la fase 4 es la pendiente a la línea basal propia de la inspiración. En términos generales, se acepta como normal el que la PaCO₂ sea mayor en 4 a 7 mmHg que el CO_{2ET}, pudiendo incrementarse esta diferencia hasta en 14 a 25 mmHg en diferentes tipos de patologías.

La CO_{2ET} es considerada igual a la tensión de CO₂ alveolar y por lo tanto de la PaCO₂, de ahí que la aplicación más común de la capnografía consiste en aceptar los valores de CO_{2ET} como un reflejo de la PaCO₂, por lo que se utiliza en la práctica clínica para evaluar la ventilación alveolar, en la hiperventila-

Cuadro V. Monitoreo normal del Doppler transcraneal.

Arteria	Profundidad (mm)	VFm (cm/s)	Ventana acústica	Dirección de flujo
ACM	38-62	58 ± 12	Transtemporal	Anterógrada
ACA/ACM	54-64	—	Transtemporal	Bidireccional
AÇA	60-78	50 ± 12	Transtemporal	Retrógrado
ACId	56-64	38 ± 10	Transtemporal	
ACP	60-72	40 ± 10	Transtemporal	Anterógrada
ACIe	50-64	37 ± 9	Submandibular	Retrógrado
AO	40-58	21 ± 5	Occipital	Retrógrado
AV	60-85	37 ± 10	Suboccipital	Retrógrado
AB	80-120	40 ± 10	Suboccipital	Retrógrado

ción del paciente con hipertensión intracraneana, efectividad de la reanimación cardiopulmonar, o simplemente como comprobación de una intubación orotraqueal exitosa.

IMPEDANCIOCARDIOGRAFÍA TRANSTORÁCICA

La técnica consiste en aplicar una micro-corriente eléctrica a través del tórax, que genera una resistencia (impedancia) que ocasiona cambios de voltaje directamente proporcionales a la actividad cardíaca. Este voltaje es medido y procesado digitalmente mediante sofisticados algoritmos para arrojar todos los valores hemodinámicos. Esta corriente se inyecta mediante unos electrodos adheridos sobre la piel del paciente, y se mide el voltaje mediante otro par de electrodos iguales.

ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CEREBRAL (EI)

La espectroscopía infrarroja es un método no invasivo que permite detectar cambios en la oxigenación cerebral regional. El mecanismo biotecnológico de la espectroscopía infrarroja se basa en la capacidad de las ondas de luz (700 – 1,000 nm) para penetrar el tejido celular subcutáneo, el crá-

neo y el cerebro hasta varios centímetros, estas ondas son absorbidas a diferente longitud de onda por la oxihemoglobina, la deoxihemoglobina y el citocromo C oxidasa. En cada unidad de volumen de tejido cerebral, el 70-80% del contenido hemático se localiza en el lecho venoso, por lo que la mayor cantidad de información de la espectroscopía será del contenido venoso cerebral. Los cambios en la hemoglobina total están relacionados con los cambios en el volumen sanguíneo cerebral^(16,17).

La mayor aplicación de la espectroscopía infrarroja se ha realizado en los enfermos que son sometidos a endarterectomía carotídea con pinzamiento carotídeo transquirúrgico y durante cirugía cardíaca. También se ha demostrado su eficacia en detectar hematomas intracraneales de aparición retardada. Sin embargo, su eficacia no ha sido demostrada en los enfermos con trauma craneoencefálico o lesión difusa del sistema nervioso central ya que no correlaciona con los cambios con la SvjO₂ o con la PtcO₂.

Actualmente el uso de la espectroscopía infrarroja no está recomendado como un parámetro único en la toma de decisiones en los enfermos con lesión encefálica aguda, aunque en ciertas patologías neurocríticas está fundamentado su empleo⁽¹⁸⁻²¹⁾.

REFERENCIAS

- Morris HA, Chapman RH, Gardner RM. Frequency of wedge pressure errors in the ICU. *Crit Care med* 1985;13:705-708.
- Frederick P. Practice parameters for hemodynamic support of sepsis in adult patients in sepsis. *Crit Care Med* 1999;27:639-660.
- Pinsky R. Hemodynamic monitoring in the intensive care unit. *Clin Chest Med* 2003;24:4.
- Rivers E, Nguyen B, Havstad S, et al. Early goal-directed therapy in the treatment of severe sepsis and septic shock. *N Engl J Med* 2001;345:1368-1377.
- Reinhart L, Kersting T, Fohring U, Schafer M. Can central venous replace mixed-venous oxygen saturation measurements during anesthesia? *Adv Exp Med Biol* 1986;200: 67-72.
- Gattinoni L, Brazzi, Pelosi P, et al. A trial of goal-oriented hemodynamic therapy in critically ill patients. SvO₂ Collaborative Group. *N Engl J Med* 1995;333:1025-1032.
- Pearse R, Dawson D, Fawcett J. Changes in central venous saturation after major surgery, and association with outcome. *Critical Care* 2005;9:694-699.
- Aaslid R, Markwalder TM, Norris N. Noninvasive transcranial Doppler ultrasound recording of flow velocity in basal cerebral arteries. *Neurosurg* 1982; 57:759.
- Voci S, Carson N. Ultrasound of the intracranial arteries. *Ultrasound Clin* 2006:161-181.
- Bhatia A, Kumar A. Neuromonitoring in the intensive care unit. I. Intracranial pressure and cerebral blood flow monitoring. *Intensive Care Med*. 2007;33:1263-1271.
- Jarus-Dziedzic K, Bogucki J, Zub W. The influence of ruptured cerebral aneurysm localization on the blood flow velocity evaluated by transcranial Doppler ultrasonography. *Neurol Res*. 2001;23:23-28.
- Lindegard KF, Nornes H, Bakke SJ, Sorteberg W, Nakstad P. Cerebral vasospasm after subarachnoid hemorrhage investigated by means of transcranial Doppler ultrasound. *Acta Neurochir* 1998;42:81-84.
- Steiger HJ, Ciessinna E, Seiler RW. Identification of posttraumatic ischemia and hyperperfusion by determination of the effect of induced arterial hypertension on carbon dioxide reactivity. *Stroke* 1996;27:2048-2051.
- Schmidt EA, Czosnyka M, Gooskens I, Piechnik SK, Matta BF, Withfeld PC, Pickard JD. Preliminary experience of the estimation of cerebral perfusion pressure using transcranial Doppler ultrasonography. *J Neurolog Neurosurg Psychiatry* 2001;70:198-204.
- Klotzsch C, Popescu O, Berlit P. A new 1 MHz probe for transcranial Doppler sonography in patients with inadequate temporal bone windows. *Ultrasound Med Biol* 1998;24:101-103.
- Kirpatrick PJ, Smielewski P, Czosnyka M, Menon DK, Pickard JD. An observational study of near infrared spectroscopy during carotid endarterectomy. *J Neurosurg* 1995;82:756-763.
- Veden JC, Gibson A, Austin T. Imaging changes in blood volume and oxygenation in the newborn infant brain using three-dimensional optical tomography. *Phys Med Biol* 2004;49:1117-1130.
- Al Rawi PG, Smielewski P, Kirkpatrick PJ. Evaluation of a near-infrared spectrometer (NIRO 300) for the detection of intracranial oxygenation changes in the adult head. *Stroke* 2001;32:2492-2500.
- Daubney PE, Smith DC, Pilkington SN. Cerebral oxygenation during paediatric cardiac surgery: identification of vulnerable periods using near infrared spectroscopy. *Eur J Cardiothorac Surg* 1998;13:370-377.
- Gospinath SP, Robertson CS, Contant CF. Early detection of delayed traumatic intracranial hematomas using near-infrared spectroscopy. *J Neurosurg* 1998;12:438-444.
- Lewis SB, Myburgh JA, Trotón EL. Cerebral oxygenation monitoring by near-infrared spectroscopy is not clinically useful in patients with severe closed-head injury: a comparison with jugular venous bulb oximetry. *Crit Care Med* 1996;24:1334-1338.