



# Revista Colombiana de Anestesiología

## Colombian Journal of Anesthesiology

www.revcolanest.com.co



### Reflexión

## Embolismo aéreo venoso en neurocirugía



Mauricio Giraldo<sup>a,\*</sup>, Luz María Lopera<sup>b</sup> y Miguel Arango<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Anestesia Cardíaca y Neuroanestesia, Departamento de Anestesiología y Medicina Perioperatoria LHSC, Western University, London, Ontario, Canadá

<sup>b</sup> Departamento de Anestesia Regional, Departamento de Anestesiología y Medicina Perioperatoria LHSC, Western University, London, Ontario, Canadá

<sup>c</sup> Profesor asociado. Director del Departamento de Neuroanestesia, Director del programa de subespecialidades en Anestesia, Departamento de Anestesiología y Medicina Perioperatoria LHSC, Western University, London, Ontario, Canadá

#### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

##### Historia del artículo:

Recibido el 18 de abril de 2014

Aceptado el 8 de julio de 2014

On-line el 14 de octubre de 2014

##### Palabras clave:

Neurocirugía

Procedimientos Neuroquirúrgicos

Embolia Aérea

Anestesia

Venas Cerebrales

##### Keywords:

Neurosurgery

Neurosurgical Procedures

Embolism, Air

Anesthesia

Cerebral Veins

#### R E S U M E N

El embolismo aéreo venoso es una complicación de neurocirugía que puede llegar a ser potencialmente seria. Todos los procedimientos neuroquirúrgicos tienen riesgo de presentarlo, siendo las posiciones sentada y semisentada las que mayor riesgo conllevan. El neuroanestesiólogo forma parte primordial en el manejo del embolismo aéreo venoso, desde su diagnóstico hasta el tratamiento. Este artículo revisa la literatura relacionada con el embolismo aéreo en cuanto a incidencia, etiología, diagnóstico y terapéutica.

© 2014 Sociedad Colombiana de Anestesiología y Reanimación. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

#### Venous air embolism in neurosurgery

#### A B S T R A C T

Venous air embolism is a potentially serious neurosurgical complication. Every neurosurgical procedure is at risk of developing the condition but the sitting and semi-sitting position represent a higher risk. The neuroanesthesiologist plays a key role in the management of the venous air embolism, from diagnosis to treatment. This article reviews the literature on air embolism in terms of its incidence, etiology, diagnosis and therapy.

© 2014 Sociedad Colombiana de Anestesiología y Reanimación. Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

\* Autor para correspondencia: 339 Windermere Rd, London Ontario Canadá, N6A5A5.

Correo electrónico: [mauro1975@gmail.com](mailto:mauro1975@gmail.com) (M. Giraldo).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rca.2014.07.001>

0120-3347/© 2014 Sociedad Colombiana de Anestesiología y Reanimación. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

## Introducción

El embolismo aéreo venoso (EAV) es una complicación potencialmente seria en neurocirugía. Su incidencia varía entre el 16 y el 86%, dependiendo del modelo de la literatura analizada<sup>1,2</sup> sin embargo, la mayoría de las veces no tiene manifestaciones clínicas relevantes. Esta amplia diferencia en la incidencia se debe probablemente a la gran variedad de técnicas quirúrgicas y anestésicas reportadas y más aún, a los diferentes métodos diagnósticos.

La mortalidad relacionada con el EAV en neurocirugía no está clara, sin embargo existen reportes de casos en los que ha existido un desenlace fatal después de la presencia de embolismo aéreo masivo<sup>3</sup>.

El riesgo de EAV está presente en todo tipo de procedimientos neuroquirúrgicos, sin embargo, su incidencia es mayor en procedimientos donde es necesaria la posición sentada<sup>4</sup> o semisentada<sup>5,6</sup>. La incidencia de embolismo aéreo en posición sentada es variable pero se ha descrito hasta en un 45% de los casos<sup>7</sup>. Puede también presentarse con el paciente en decúbito lateral, supino o prono<sup>8</sup>. Los procedimientos más relacionados con EAV son la craneotomía en posición sentada, la cirugía de fosa posterior y la reparación de craneosinostosis<sup>9,10</sup>.

En neurocirugía pediátrica su incidencia se ha reportado entre el 9,8 y 0,42%<sup>11,12</sup>.

La incidencia reportada en procedimientos neuroendoscópicos es baja pero puede también presentarse<sup>13</sup>.

Aunque infrecuente, algunos pacientes con enfermedad pulmonar severa o pacientes obesos podrían beneficiarse de la posición semisentada o sentada en el ámbito neuroquirúrgico<sup>14</sup>.

## Fisiopatología

El embolismo aéreo se presenta cuando existe una diferencia de presiones en dos sitios diferentes del sistema venoso, que a su vez genera un gradiente de presión negativo o subatmosférico entre la aurícula derecha y los senos venosos craneanos. Cuando el sistema venoso del sistema nervioso central está expuesto a la presión del ambiente y hay una diferencia de al menos 5 cm de H<sub>2</sub>O entre los dos sitios se producirá la entrada y flujo de aire<sup>15,16</sup>.

Existen diversos factores para que el embolismo aéreo tenga repercusión clínica, entre los cuales están el volumen de aire, la posición del paciente y el tipo de procedimiento quirúrgico<sup>9</sup>.

En humanos, la dosis letal de embolismo aéreo es de 3-4 ml/kg<sup>17</sup>. El volumen de aire en el sistema venoso que puede desencadenar manifestaciones clínicas está alrededor de 100 ml en el adulto<sup>15</sup>. Una vez que el aire ingresa en el sistema circulatorio se ubica entre la vena cava superior y la aurícula derecha. Parte de este volumen de aire puede pasar a través de la válvula tricúspide y llegar a la arteria pulmonar. Cuando la cantidad de aire es pequeña los capilares pulmonares pueden filtrarla, pero cuando el volumen de aire es mayor, el aire pasa a los capilares pulmonares causando vasoconstricción y alteraciones en la relación de la ventilación y la perfusión pulmonar<sup>15</sup>. Este aire puede causar obstrucción del

flujo de la arteria pulmonar llevando a una disminución del gasto cardíaco, bien sea por insuficiencia cardíaca derecha aguda (obstrucción al tracto de salida del ventrículo derecho) o por reducción de llenado del ventrículo izquierdo (disminución en el flujo sanguíneo de las venas pulmonares)<sup>18</sup>.

## Etiología

Como se mencionó anteriormente, el EAV puede presentarse en todo tipo de procedimientos neuroquirúrgicos. El procedimiento con más riesgo de presentar EAV es aquel en que el paciente debe estar en posición sentada o semisentada, sin embargo es importante anotar que el hecho de estar en posición supina no descarta la probabilidad de EAV<sup>19,20</sup>. Es por esta razón que cada vez es menos frecuente que la posición sentada y semisentada se utilice en neurocirugía<sup>21</sup>, no solo debido a la alta incidencia de EAV sino también por el riesgo de presentarse otras complicaciones, como la lesión del nervio ciático, macroglosia, neumoencéfalo a tensión, entre otras; en Norte América es cada vez menos utilizada, aunque en Europa todavía se sigue escogiendo de manera rutinaria, siendo la posición preferida para la cirugía de fosa posterior<sup>22</sup>.

La cirugía para la corrección de craneosinostosis se encuentra entre los procedimientos que tienen mayor incidencia de EAV y es una causa importante de morbimortalidad en la población pediátrica<sup>23</sup>.

Recientemente, la cirugía de estimulación cerebral profunda con el paciente despierto para el tratamiento de Parkinson y otros desórdenes de movimiento se ha relacionado con un alto riesgo de presentar EAV. Chang et al., encontraron una incidencia de 1,3% de EAV en una serie retrospectiva de 467 pacientes sometidos a estimulación cerebral profunda<sup>5</sup>. Otros estudios recientemente publicados han reportado una incidencia de 3,2% de EAV en la cirugía de estimulación profunda en una serie retrospectiva de 287 casos y una incidencia de 4,5% en una serie prospectiva de 22 casos<sup>24</sup>.

El embolismo aéreo también se ha reportado en cirugía esterotáxica<sup>25</sup>. Una serie de 36 cirugías esterotáxicas reportó 3 casos de embolismo aéreo sintomático (8,3%) y en 5 casos se evidenció embolismo aéreo radiográfico en tomografías postoperatorias (13,8%). En este estudio se encontró una relación entre la posición de la cabeza elevada y la aparición del embolismo aéreo, incluso sin que este volumen de aire repercutiera en la estabilidad hemodinámica del paciente.

## Manifestaciones clínicas

Cuando el paciente está despierto durante el procedimiento quirúrgico, el EAV se puede manifestar como un episodio de tos asociada a desaturación arterial de oxígeno, hipotensión arterial<sup>26</sup>, disnea, dolor precordial y náuseas. Puede además auscultarse un soplo cardíaco de novo<sup>27,28</sup>.

En el postoperatorio los pacientes pueden cursar con deterioro neurológico, que puede ir desde lesiones neurológicas focales hasta el coma<sup>29</sup>. Pueden cursar también con alteraciones cardiovasculares como insuficiencia cardíaca derecha aguda, hipertensión pulmonar, isquemia miocárdica, edema pulmonar asociado<sup>30</sup> y colapso cardiovascular<sup>31</sup>.

También se ha reportado la presencia de coagulopatía y reducción de recuento plaquetario después de EAV, al parecer desencadenada por un efecto de las burbujas de aire en la microvasculatura pulmonar, desencadenando la liberación de factores inflamatorios y la activación plaquetaria<sup>27,32</sup>, aunque Duda et al. en su estudio no evidenció presencia de marcadores inflamatorios cuando compararon pacientes en posición sentada con posición supina en neurocirugía<sup>33</sup>.

## Diagnóstico

### Capnografía

Una reducción súbita en el nivel de CO<sub>2</sub> espirado asociada a hipotensión arterial, es altamente sugestiva de embolismo aéreo<sup>8</sup>. La capnografía es una herramienta diagnóstica de fácil acceso y económica, con moderada sensibilidad y especificidad, que permite hacer el diagnóstico de embolismo aéreo cuando el paciente está despierto o bajo anestesia general.

### Doppler precordial

El Doppler precordial puede detectar la presencia de aire en la sangre. Es altamente sensible comparado con la capnografía y la monitorización hemodinámica convencional para el diagnóstico de EAV, pero por ser un método subjetivo y no cuantitativo, puede generar falsos negativos en el diagnóstico. El transductor debe ubicarse sobre la aurícula derecha, cuando el paciente ya esté en la posición definitiva para cirugía<sup>34</sup>. De rutina debe realizarse una prueba antes de iniciar el procedimiento; se inyecta a través del catéter central un volumen de 0,25 a 1 mL de aire o 3 a 5 mL de solución salina agitada. El anestesiólogo debe familiarizarse con el sonido Doppler precordial cuando el aire entra a las cavidades cardíacas y así tener un punto de referencia antes de iniciar el procedimiento.

### Ecocardiografía transesofágica

La ecocardiografía transesofágica (ETE) tiene la ventaja de realizar un diagnóstico preciso, con la posibilidad de aportar una gran cantidad de información<sup>35</sup>, además del diagnóstico de embolismo aéreo. Su uso es esencial en el diagnóstico de foramen oval permeable<sup>36</sup> que puede estar permeable hasta en el 35% de la población y conducir a embolismo del sistema nervioso central<sup>37</sup>. La ETE es el método invasivo más sensible para el diagnóstico de embolismo aéreo<sup>9</sup>, además puede permitir el diagnóstico de embolismo aéreo paradójico<sup>38</sup>. La ETE permite diagnosticar pequeños volúmenes de aire en el corazón, del orden de 0,01-0,19 mL/kg<sup>39</sup>.

En un estudio realizado en India en 140 pacientes sometidos a cirugía de fosa posterior, compararon el uso de ETCO<sub>2</sub> con ETE en el diagnóstico de embolismo aéreo, y concluyeron que cuando hay diagnóstico de embolismo aéreo con ETE pero no hay cambios asociados en la capnografía, es poco probable que el embolismo aéreo produzca alguna alteración hemodinámica<sup>40</sup>. La desventaja de la ETE es que es costosa y requiere entrenamiento especializado por parte del anestesiólogo para poder hacer un diagnóstico preciso. Además, el uso rutinario de ecocardiografía transesofágica no garantiza

la realización del diagnóstico de embolismo aéreo en todos los casos<sup>41</sup>.

## Otros métodos diagnósticos

En el postoperatorio, el diagnóstico se puede hacer por medio de tomografía computarizada. La presencia de aire en los senos venosos duramadre, en la vena cortical o en el plejo pterigoideo harían el diagnóstico<sup>28</sup>.

Otro método utilizado en el diagnóstico es la medición de nitrógeno espirado. La aparición de este gas en el monitor de gases espirados cuando el paciente está respirando oxígeno al 100% es altamente sugestiva de EAV, pero no es utilizado de manera rutinaria en monitorización neuroanestésica<sup>9</sup>.

El papel del Doppler transcraneal en el diagnóstico de EAV se limita a que es altamente sensible para detectar embolismo aéreo arterial en presencia de un foramen oval permeable<sup>42,43</sup>.

El uso de microagregados de albúmina y tecnecio en escáner pulmonar ha sido otro método usado para confirmar la presencia de embolismo aéreo<sup>44</sup>.

## Tratamiento

El tratamiento del EAV va encaminado a detener la entrada de aire al sistema circulatorio y al manejo de las complicaciones que puedan presentarse.

Tener al paciente adecuadamente hidratado previo al procedimiento, ayuda a prevenir la aparición de EAV. Mantener una volemia adecuada (guiándose por la presión venosa central o variables dinámicas como la variación del volumen sistólico) hace que el gradiente de presión entre la aurícula derecha y el puerto de entrada venoso pueda ser menor.

Ante la sospecha de embolismo venoso el anestesiólogo debe informar inmediatamente al neurocirujano para que este comience la irrigación del campo quirúrgico y dé cobertura a los vasos sanguíneos que puedan estar expuestos. Se debe utilizar oxígeno al 100% y en todos los casos evitar el uso de óxido nítrico<sup>45</sup>, así como las mezclas de aire/oxígeno.

La cabeza del paciente se debe repositionar al nivel de la aurícula derecha y si es posible, colocar al paciente en decúbito lateral izquierdo (maniobra de Durant) para que las burbujas de aire se desplacen hacia la aurícula derecha. Si el paciente cuenta con un catéter venoso central, se debe aspirar el aire que pueda encontrarse entre la vena cava superior y la aurícula derecha<sup>46</sup>. En un estudio en caninos, se mostró que la presencia de un catéter en la aurícula derecha podría aspirar hasta el 50% del volumen de aire embolizado<sup>47</sup>.

Si se trata de un embolismo masivo, las maniobras de reanimación avanzada se deben instaurar rápidamente<sup>15</sup>.

La compresión bilateral transitoria de las venas yugulares se ha descrito como técnica para reducir la entrada de aire por los senos venosos expuestos. Al disminuir el retorno venoso cerebral se aumenta el flujo retrógrado venoso y se interrumpe la entrada de aire. Es una maniobra controversial puede aumentar la presión intracraneal, disminuir la perfusión cerebral y comprimir concomitantemente las arterias carótidas.

El uso de PEEP es controvertido, no hay evidencia de que mejore el EAV en neurocirugía, y puede deteriorar el estado cardiovascular del paciente<sup>48</sup>.

La terapia con oxígeno hiperbárico ha aumentado recientemente<sup>18</sup>. El oxígeno hiperbárico reduce el tamaño de las burbujas al favorecer la reabsorción de nitrógeno y favorece el paso de oxígeno disuelto a la sangre<sup>49</sup>. El uso de oxígeno hiperbárico se ha aplicado más al embolismo aéreo arterial a nivel cerebral. Existen también en la literatura casos reportados con el uso de ventilación espontánea durante neurocirugía en posición sentada y uso de ecocardiografía con buenos resultados<sup>50</sup>.

## Conclusiones

El embolismo aéreo venoso puede ser una complicación seria en neurocirugía. La posición semisentada o sentada es el factor de riesgo más importante para su aparición. Existen diferentes métodos diagnósticos disponibles siendo la ecocardiografía transesofágica uno de los más sensibles, pero requiere de adecuado entrenamiento por parte del anestesiólogo. El tratamiento está dirigido a disminuir el flujo de aire cuando se confirma el diagnóstico y la implementación de medidas de reanimación adecuadas en caso de un embolismo masivo.

## Responsabilidades éticas

**Protección de personas y animales.** Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

**Confidencialidad de los datos.** Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

**Derecho a la privacidad y consentimiento informado.** Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

## Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## REFERENCIAS

- Ganslandt O, Merkel A, Schmitt H, Tzabazis A, Buchfelder M, Eyupoglu I, et al. The sitting position in neurosurgery: indications, complications and results. a single institution experience of 600 cases. *Acta Neurochir (Wien)*. 2013;155:1887-93.
- Tobias JD, Johnson JO, Jimenez DF, Barone CM, McBride DS. Venous air embolism during endoscopic strip craniectomy for repair of craniosynostosis in infants. *Anesthesiology*. 2001;95:340-2.
- Wei S-T, Chen D-C. Catastrophic venous air embolism during craniotomy in the supine position: the bleeding pattern as a warning sign? *J Craniofac Surg*. 2013;24:e228-9.
- Israeli L, Shimanskii V, Otamanov D, Poshataev V, Lubnin A. Patient positioning on the operating table in neurosurgery: sitting or lying. *Anesteziol Reanimatol*. 2013;18-26.
- Chang EF, Cheng JS, Richardson RM, Lee C, Starr PA, Larson PS. Incidence and management of venous air embolisms during awake deep brain stimulation surgery in a large clinical series. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2011;89:76-82.
- Ammirati M, Lamki TT, Shaw AB, Forde B, Nakano I, Mani M. A streamlined protocol for the use of the semi-sitting position in neurosurgery: A report on 48 consecutive procedures. *J Clin Neurosci*. 2013;20:1-6.
- Young ML, Smith DS, Murtagh F, Vasquez A, Levitt J. Comparison of surgical and anesthetic complications in neurosurgical patients experiencing venous air embolism in the sitting position. *Neurosurgery*. 1986;157-61.
- Vinay B, Sriganesh K, Gopala Krishna KN. An abrupt reduction in end-tidal carbon-dioxide during neurosurgery is not always due to venous air embolism: a capnograph artefact. *J Clin Monit Comput*. 2013;5-7.
- Mirski MA, Lele AV, Fitzsimmons L, Toung TJK. Diagnosis and treatment of vascular air embolism. *Anesthesiology*. 2007;106:164-77.
- Felema GG, Bryskin RB, Heger IM, Saswata R. Venous air embolism from Tisseel use during endoscopic cranial vault remodeling for craniosynostosis repair: a case report. *Paediatr Anaesth*. 2013. Aug [cited Apr 14];23(8):754-6 2014.
- Harrison EA, Mackersie A, McEwan A, Facer E. The sitting position for neurosurgery in children: a review of 16 years' experience. *Br J Anaesth*. 2002;88:12-7.
- Aleksic V, Radulovic D, Milakovic B, Nagulic M, Vucovic D, Antunovic V, et al. A retrospective analysis of anesthesiologic complications in pediatric neurosurgery. *Paediatr Anaesth*. 2009;19:879-86.
- Singh G, Prabhakar H, Bithal P, Dash H. A retrospective analysis of perioperative complications during intracranial neuroendoscopic procedures: Our institutional experience. *Ann Indian Acad Neurol*. 2011;59:465-6.
- Mertens C, Schmitt H, Tzabazis A. Advantages of the Sitting Position in a Case of Severe COPD. *J Neurosurg Anesth*. 2013;25:93-4.
- Palmon SC, Moore LE, Lundberg J, Toung T. Venous air embolism: a review. *J Clin Anesth*. 1997;251-7.
- Paladino MA. Eventos intraoperatorios en neurocirugía. *Rev Arg Anest*. 2004;62:133-51.
- Toung TJ, Rossberg MI, Hutchins GM. Volume of air in a lethal venous air embolism. *Anesthesiology*. 2001;360-1.
- Van Hulst RA, Klein J, Lachmann B. Gas embolism: pathophysiology and treatment. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2003;23:237-46.
- Albin MS. Venous air embolism: a warning not to be complacent—we should listen to the drumbeat of history. *Anesthesiology*. 2011;115:626-9.
- Hassan WMNW, Zainuddin A, Ali S. Venous air embolism during elective craniotomy for parasagittal meningioma. *Med J Malaysia*. 2013;68:69-70.
- Rama-Maceiras P, Fàbregas N, Ingelmo I, Hernández-Palazón J. Encuesta sobre el tratamiento anestesiológico de los pacientes sometidos a neurocirugía de fosa posterior. *Rev Esp Anestesiología Reanim*. 2009;56:9-15.
- Misra BK. Neurosurgery in the semisitting position in patients with a patent foramen ovale. *World Neurosurg*. 2014;82:e41-2.
- Faberowski LW, Black S, Mickle JP. Incidence of venous air embolism during craniectomy for craniosynostosis repair. *Anesthesiology*. 2000;92:20-3.
- Hooper AK, Okun MS, Foote KD, Haq IU, Fernandez HH, Hegland D, et al. Venous air embolism in deep brain stimulation. *Stereotact Funct Neurosurg*. 2009;87:25-30.



25. Ooba H, Abe T, Momii Y, Fujiki M. Venous air embolism (VAE) associated with stereotactic biopsies. *Acta Neurochir (Wien)*. 2013.
26. Bithal PK, Pandia MP, Dash HH, Chouhan RS, Mohanty B, Padhy N. Comparative incidence of venous air embolism and associated hypotension in adults and children operated for neurosurgery in the sitting position. *Eur J Anaesthesiol*. 2004;21:517-22.
27. Moningi S, Kulkarni D, Bhattacharjee S. Coagulopathy following venous air embolism: a disastrous consequence -a case report-. *Korean J Anesthesiol*. 2013;65:349-52.
28. Kumar R, Goyal V, Chauhan RS. Venous air embolism during microelectrode recording in deep brain stimulation surgery in an awake supine patient. *Br J Neurosurg*. 2009;23:446-8.
29. Furtado SV, Venkatesh PK, Murthy GK, Furtado AD, Hegde AS. Paradoxical embolus across atrial septal defect and posterior circulation infarct in neurosurgical patients. *Int J Neurosci*. 2010;120:516-20.
30. Arora R, Chablani D, Rath GP, Prabhakar H. Pulmonary oedema following venous air embolism during transsphenoidal pituitary surgery. *Acta Neurochir (Wien)*. 2007;149:1177-8.
31. El-Zenati H, Faraj J, Al-Rumaihi GI. Air embolism related to removal of Mayfield head pins. *Asian J Neurosurg*. 2012;7:227-8.
32. Schäfer ST, Sandalcioglu IE, Stegen B, Neumann A, Asgari S, Peters J. Venous air embolism during semi-sitting craniotomy evokes thrombocytopenia. *Anaesthesia*. 2011;66:25-30.
33. Duda I, Grzybowska K, Jędrzejowska-Szypułka H, Lewin-Kowalik J. The sitting position during neurosurgical procedures does not influence serum biomarkers of pulmonary parenchymal injury. *BMC Surg*. 2012;12:24.
34. Schubert A, Deogaonkar A, Drummond JC. Precordial Doppler probe placement for optimal detection of venous air embolism during craniotomy. *Anesth Analg*. 2006;102:1543-7.
35. Feigl GC, Decker K, Wurms M, Krischek B, Ritz R, Unertl K, et al. Neurosurgical procedures in the semisitting position: evaluation of the risk of paradoxical venous air embolism in patients with a patent foramen ovale. *World Neurosurg*. 2014;81:159-64.
36. Nozaki K. Selection of semisitting position in neurosurgery: essential or preference? *World Neurosurg Elsevier Inc*. 2014;81:62-3.
37. Shaikh N, Ummunisa F. Acute management of vascular air embolism. *J Emerg Trauma Shock*. 2009;2:180-5.
38. Schlundt J, Tzanova I, Werner C. A case of intrapulmonary transmission of air while transitioning a patient from a sitting to a supine position after venous air embolism during a craniotomy. *Can J Anaesth*. 2012;59:478-82.
39. Fathi A-R, Eshtehardi P, Meier B. Patent foramen ovale and neurosurgery in sitting position: a systematic review. *Br J Anaesth*. 2009;102:588-96.
40. Pandia MP, Bithal PK, Dash HH, Chaturvedi A. Comparative incidence of cardiovascular changes during venous air embolism as detected by transesophageal echocardiography alone or in combination with end tidal carbon dioxide tension monitoring. *J Clin Neurosci Elsevier Ltd*. 2011;18:1206-9.
41. Wong AY, Irwin MG. Large venous air embolism in the sitting position despite monitoring with transesophageal echocardiography. *Anaesthesia*. 2005;60:811-3.
42. Stendel R, Gramm HJ, Schröder K, Lober C, Brock M. Transcranial Doppler ultrasonography as a screening technique for detection of a patent foramen ovale before surgery in the sitting position. *Anesthesiology*. 2000;93(4):971-5.
43. Hervías A, Valero R, Hurtado P, Gracia I, Perelló L, Tercero F, et al. Detection of venous air embolism and patent foramen ovale in neurosurgery patients in sitting position. *Neurocirugia*. 2014;C14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucir.2014.03.002>.
44. Albin M. Venous air embolism: a warning not to be complacent- we should listen to the drumbeat of history. *Anesthesiology*. 2011;115:626-9.
45. Pasternak JJ, Lanier WL. Is nitrous oxide use appropriate in neurosurgical and neurologically at-risk patients? *Curr Opin Anaesthesiol*. 2010;23:544-50.
46. Aragonés Manzanares R, Cabello Roig B, Medina Arteaga A, Muñoz Lopez A, Sellar Pérez G, Delgado Amaya M. Edema pulmonar agudo tras embolismo aéreo venoso central. *Med Intensiva*. 2002;26:127-31.
47. Adornato DC, Gildenberg PL, Ferrario CM, Smart J, Frost EA. Pathophysiology of intravenous air embolism in dogs. *Anesthesiology*. 1978;49:120-7.
48. Basaldella L, Ortolani V, Corbanese U, Sorbara C, Longatti P. Massive venous air embolism in the semi-sitting position during surgery for a cervical spinal cord tumor: anatomic and surgical pitfalls. *J Clin Neurosci Elsevier Ltd*. 2009;16:972-5.
49. Kjeld T, Hansen EG, Holler NG, Rottensten H, Hyldegaard O, Jansen EC. Resuscitation by hyperbaric exposure from a venous gas emboli following laparoscopic surgery. *Scand J Trauma Resusc Emerg Med*. 2012;20:51.
50. Pandia MP, Bithal PK, Sharma MS, Bhagat H, Prasanna B. Use of spontaneous ventilation to monitor the effects of posterior fossa surgery in the sitting position. *J Clin Neurosci Elsevier Ltd*. 2009;16:968-9.