

## Evaluación del espacio muerto ajustado al volumen corriente en pacientes con ventilación mecánica

**Carolina Magaña Macías,\* Carmina Salinas Martínez,\* Jesús Santiago Toledo,\* Claudia Olvera Guzmán,\* Janet Aguirre Sánchez,\* Juvenal Franco Granillo†**

### RESUMEN

**Introducción:** El espacio muerto fisiológico ajustado al volumen corriente (V<sub>d</sub>/V<sub>t</sub>) es usualmente omitido en los pacientes críticos ya que debe obtenerse mediante calorimetría indirecta. Frankelfield modificó la fórmula original de Bohr incluyendo frecuencia respiratoria (f) y edad: V<sub>d</sub>/V<sub>t</sub> = 0.32 + 0.0106 (PaCO<sub>2</sub> – CO<sub>2</sub>et) + 0.003 (f) + 0.0015 (edad).

**Objetivo:** Determinar la utilidad del V<sub>d</sub>/V<sub>t</sub> en pacientes con ventilación mecánica (AMV).

**Métodos:** Estudio prospectivo observacional de pacientes en AMV de noviembre del 2009 a julio del 2010. Se obtuvieron demográficos y parámetros respiratorios: f, distensibilidad estática, V<sub>t</sub>. Se obtuvieron sensibilidad y especificidad para cada parámetro y se identificó un punto de corte para V<sub>d</sub>/V<sub>t</sub>.

**Resultados:** 48 pacientes se incluyeron: 16 (42%) mujeres; edad promedio: 53 ± 22. APACHE II promedio: 8 ± 5. 20% (n = 10) fracasaron al retiro de la AMV (reintubación). El V<sub>d</sub>/V<sub>t</sub> promedio de todos fue 0.52 ± 0.06; los que lograron extubarse: 0.50 ± 0.05 vs reintubados: 0.59 ± 0.53. El mejor valor de V<sub>d</sub>/V<sub>t</sub> fue < 0.55 con sensibilidad 80%, especificidad 87%, valor predictivo positivo: 62% y negativo 94%.

**Conclusiones:** Un V<sub>d</sub>/V<sub>t</sub> < 0.55 está asociado con extubación exitosa.

**Palabras clave:** Espacio muerto, V<sub>d</sub>/V<sub>t</sub>, volumen corriente.

### SUMMARY

**Introduction:** The accurate measurement of physiological dead space to tidal volume ratio (Vd/Vt) is usually omitted in the ICU as exact values need indirect calorimetry to be obtained. Frankelfield modified the original Bohr formula ( $Vd/Vt = PaCO_2 - CO_2 et/PaCO_2$ ) by including age and Rate Respiratory (RR):  $Vd/Vt = 0.32 + 0.0106 (PaCO_2 - CO_2 et) + 0.003 (RR) + 0.0015 (\text{age})$ .

**Objective:** To determine Vd/Vt usefulness in patients under Mechanical ventilation (MV).

**Methods:** Prospective observational study of all patients under MV admitted from November 2009 to July 2010. Demographics were obtained as well as respiratory parameters. RR, minute, static compliance, tidal volume (V<sub>t</sub>); Vd/Vt were calculated and correlated with variables obtained. Sensitivity and specificity was calculated and Vd/Vt cutoff points were obtained.

**Results:** 48 patients were included, 16 (42%) female; mean age 53 ± 22; APACHE II score 8 ± 5. Mean Vd/Vt value: 0.52 ± 0.06. Only 10 (20%) were reintubated and had a mean Vd/Vt of 0.50 ± 0.05 vs 0.59 ± 0.53 of successfully extubated ones ( $p = 0.0001$ ). Best Vd/Vt cutoff value was ≤ 0.55 with 80% sensitivity, 87% specificity, positive predictive value of 62% and negative of 94%.

**Conclusions:** Patients with Vd/Vt ≤ 0.55 are successfully extubated.

**Key words:** Dead space, Vd/Vt, tidal volume.

www.medicgraphic.org.mx

\* Departamento de Medicina Crítica «Dr. Mario Shapiro» Centro Médico ABC.

† Jefe del Departamento de Medicina Crítica «Dr. Mario Shapiro». Centro Médico ABC.

Premio Mario Shapiro 2010

Fecha de recepción: 18 de agosto 2010

Fecha de aceptación: 18 de agosto 2010

Este artículo puede ser consultado en versión completa en <http://www.medicgraphic.com/medicinacritica>

## INTRODUCCIÓN

El retiro de la asistencia mecánica ventilatoria es el proceso de suspensión del soporte mecánico, cuando la causa de la insuficiencia respiratoria se encuentra en vías de resolución. El periodo de retiro del ventilador puede representar más del 40% del tiempo total de asistencia ventilatoria.<sup>1</sup>

El proceso de discontinuar la ventilación mecánica habitualmente se refiere como destete o *weaning*. En sentido estricto, el término hace referencia a la disminución en el soporte ventilatorio a medida que el paciente asume una mayor proporción de la ventilación total. Sin embargo, ¿Cómo determinar que un paciente es capaz de asumir la ventilación por sí mismo? Varios estudios han mostrado que un método directo de evaluar la capacidad de mantener la respiración espontánea es simplemente iniciar un ensayo de ventilación espontánea.<sup>1</sup> Una vez que el paciente es capaz de mantener una respiración espontánea, un segundo aspecto a evaluar es cuándo retirar la vía aérea artificial. La predicción del retiro de la asistencia respiratoria es el proceso de estimación del éxito o del fracaso de tal retiro y/o de la extubación, en un paciente específico en un momento específico.<sup>2</sup> El inicio del retiro se puede determinar mediante la aplicación de una prueba que evalúe la probabilidad del éxito o fracaso de la maniobra. Se debe tener presente que a pesar de aplicar los más variados índices predictivos, la incidencia de reintubación continúa siendo elevada, alcanzando de 12 a 25% de los pacientes.<sup>2</sup> Se han propuesto múltiples formas para determinar la probabilidad de éxito. Los predictores simples incluyen medidas de la mecánica respiratoria y del trabajo respiratorio (ej: capacidad vital forzada, presión inspiratoria máxima), medidas del intercambio gaseoso (relación  $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$  y  $\text{PaO}_2/\text{PAO}_2$ ), y medidas de la adecuación de la perfusión sistémica (pH intragástrico).<sup>2</sup>

Por otro lado, se debe tener presente que el valor predictivo positivo de una prueba, estima la posibilidad de que el paciente podrá ser retirado del respirador si el predictor indica éxito, y el valor predictivo negativo establece la posibilidad de fracaso de la maniobra si el predictor indica fracaso. Se admite que los predictores univariados son indicadores más confiables del éxito que del fracaso del retiro.<sup>2</sup> Para mejorar la capacidad de predecir el éxito o fracaso del retiro, se han desarrollado una serie de predictores multivariados.<sup>2</sup>

## MARCO TEÓRICO

### Destete de la ventilación mecánica

En pacientes con insuficiencia respiratoria grave, la ventilación mecánica es la técnica que asume las funciones respiratorias durante el tiempo suficiente para que el propio sistema del paciente sea capaz de realizar su función normal. La prolongación innecesaria del tiempo de ventilación mecánica aumenta el tiempo de estancia en la UTI, incrementa los costos y somete al paciente a riesgos innecesarios. Se conoce como destete al proceso de retiro de la ventilación mecánica, mediante el cual el paciente asumirá una respiración espontánea, conservando la vía aérea artificial, para poder pasar a una fase posterior de retiro del tubo orotraqueal.<sup>3</sup>

En la mayoría de los casos, el paciente puede iniciar la respiración espontánea con poca o ninguna dificultad, especialmente aquellos que han requerido soporte ventilatorio durante un tiempo breve. Sin embargo con pacientes con ventilación mecánica prolongada, o que han presentado insuficiencia respiratoria grave, el destete puede presentar cierta dificultad. Del tiempo total de la ventilación mecánica, hasta un 40% puede estar dedicado al retiro.<sup>3</sup>

Un destete inadecuado contribuye a una extubación precoz, requiriendo reintubación en las horas posteriores con un consiguiente aumento del riesgo de complicaciones y de mortalidad.<sup>4</sup>

El «destete» comienza una vez que se ha producido una mejoría o resolución de la causa que motivó la instauración de la ventilación mecánica y cumple una serie de criterios:

1. Evidencia de resolución de la causa de la falla respiratoria.
2. Adecuada oxigenación ( $\text{PaO}_2/\text{FiO}_2$  de 150 a 200), PEEP de 5 a 8 cmH<sub>2</sub>O,  $\text{FiO}_2$  de 0.4-0.5, pH mayor de 7.25.
3. Estabilidad hemodinámica la cual es definida por la ausencia de isquemia miocárdica activa, ausencia de hipotensión clínicamente significativa o que requiere fármacos vasoactivos a dosis bajas (Dopamina o dobutamina < 5 ug/kg/min).
4. La capacidad de realizar un esfuerzo espontáneo.<sup>4</sup>

### Índices predictivos del destete

Se han buscado criterios objetivos que nos permitan identificar aquellos pacientes que van a realizar una prueba de ventilación espontánea con éxito.

Muchos factores pueden influir en el pronóstico del destete, los parámetros utilizados como índices predictivos, los criterios para definir éxito o fracaso, el momento en el que cada paciente es estudiado, la práctica clínica de cada unidad y las diferentes poblaciones.<sup>5</sup> La búsqueda de un índice predictivo de éxito o fracaso en el destete, que sea confiable, reproducible, de bajo costo y sencillo como para ser realizado al borde de la cama del paciente ha sido motivo de numerosos estudios.

Estos criterios objetivos son utilizados para predecir la capacidad del paciente para soportar con éxito la ventilación espontánea con una oxigenación adecuada.<sup>5</sup>

Teniendo en cuenta que la oxigenación la podemos monitorizar fácilmente con la pulsoximetría o con el análisis de gases arteriales, la mayoría de los parámetros de destete se centran en la valoración de la capacidad ventilatoria.

#### Medidas de la función neuromuscular

Presión inspiratoria máxima (Pmax, fuerza inspiratoria negativa).

La presión máxima generada en un esfuerzo inspiratorio, realizado desde la capacidad residual funcional, se utiliza frecuentemente para evaluar la fuerza de los músculos respiratorios. En condiciones normales el hombre puede realizar una Pmax superior a 100 cmH<sub>2</sub>O (presión negativa). Para predecir un destete satisfactorio se utiliza un umbral de presión entre -20 y -30 cmH<sub>2</sub>O.<sup>6</sup>

La medición de la Pmax requiere el esfuerzo y cooperación del enfermo por lo que a veces es difícil obtener una medida adecuada. Para mejorar su realización y reproducibilidad, se utiliza el método descrito por Truwitt y Marini, que no depende de la cooperación del enfermo. La vía aérea se ocuye durante 20-25 segundos con una válvula unidireccional que permite al paciente exhalar pero no inhalar, obligando al enfermo a realizar un gran esfuerzo inspiratorio.<sup>7</sup>

#### Presión de oclusión de la vía aérea ( $P_{0.1}$ )

La presión de oclusión de la vía aérea es la presión medida a los 100 milisegundos de iniciarse un esfuerzo inspiratorio frente una vía aérea ocluida. Aunque es una presión negativa, los valores de  $P_{0.1}$  se indican en valores positivos; en personas sanas el valor de  $P_{0.1}$  suele ser menor de 2 H<sub>2</sub>O. Este índice es una medida del estímulo respiratorio; un es-

tímulo elevado durante la respiración espontánea podría dar lugar a un desequilibrio entre la carga mecánica y la función neuromuscular. Hasta el momento, los estudios realizados son escasos y se han efectuado generalmente en grupos pequeños de enfermos y ningún estudio ha logrado determinar el umbral que permite discriminar con precisión el fracaso o el éxito del proceso.<sup>8</sup>

#### Capacidad vital

La capacidad vital integra la fuerza de los músculos respiratorios y la impedancia del sistema respiratorio, pero es dependiente del esfuerzo del paciente y de su nivel de cooperación. El valor normal de la capacidad vital se encuentra entre 65 y 75 mL/kg. Se ha sugerido que un valor mayor de 10 mL/kg predice el éxito del destete, pero esto no se ha comprobado que tenga utilidad clínica.<sup>8</sup>

#### Medidas de la carga de los músculos respiratorios

##### Volumen minuto (VE)

El volumen minuto es la ventilación total en litros por minuto. Su relación con la presión parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) es un buen indicador de las demandas a las que está siendo sometido el sistema respiratorio. La pCO<sub>2</sub> arterial es proporcional a consumo de CO<sub>2</sub> (VCO<sub>2</sub>) y la ventilación alveolar (VA):

$$pCO_2 = VCO_2 / VA$$

donde VA = VE-VD y VE es el volumen minuto y VD, volumen o espacio muerto.

Cualquier proceso que aumenta VCO<sub>2</sub> o VD aumenta los requerimientos de VE para mantener una pCO<sub>2</sub> normal y, como consecuencia la carga de los músculos respiratorios.

El CO<sub>2</sub> está determinado por la tasa metabólica total y aumenta en diversas circunstancias fisiológicas y patológicas: Ejercicio, quemaduras, fiebre, falla orgánica múltiple e hipertiroidismo.<sup>8</sup>

Tradicionalmente se ha considerado que un VE < 10 L min se asocia con el éxito del destete, pero sucesivos estudios, con diferentes puntos de corte, han confirmado a este parámetro como un mal indicador del éxito del destete.<sup>8</sup> Mientras que unos niveles altos de VE (> 15 a 20 L/min) pueden ayudar a identificar a los pacientes que no son capaces de mantener la respiración espontánea, unos niveles inferiores no predicen el éxito de la desconexión.<sup>8</sup>

### *Distensibilidad del sistema respiratorio*

La distensibilidad estática del sistema respiratorio es la relación presión-volumen de los pulmones y la pared torácica. La medida simple de la distensibilidad se ha sugerido también como un predictor útil del éxito o fracaso del destete con la base teórica de que un sistema respiratorio rígido predispone al fracaso. Sin embargo, como se describe en el trabajo publicado por Yang y Tobin, una distensibilidad estática de 33 mL/cmH<sub>2</sub>O tan solo tiene un valor predictivo positivo de 0.60 y un valor predictivo negativo de 0.53.<sup>8</sup>

### *Índices integrados*

#### *Índices de respiración rápida superficial o índice de Yang-Tobin*

La respiración rápida y superficial es uno de los signos frecuentes en aquellos pacientes que no toleran una prueba de ventilación espontánea. El índice de Yang-Tobin es un cociente entre la frecuencia respiratoria y el volumen corriente (f/Vt). Yang y Tobin realizaron un estudio prospectivo en 100 pacientes críticos y demostraron que la relación entre frecuencia respiratoria y volumen corriente (expresado en litros) es el mejor indicador de éxito o fracaso del retiro del ventilador.

Estableciendo un punto de referencia de 105 respiraciones por minuto/L, el índice de respiración rápida superficial o VRS, tuvo una sensibilidad de 0.97 una especificidad de 0.64, un valor predictivo positivo de 0.78, un valor predictivo negativo de 0.95 y un área bajo la curva ROC de 0.89.<sup>8</sup>

Para retirar al paciente del ventilador, debe llevarse a cabo una prueba de ensayo-error, en la cual se evalúa si tolerará o no la ventilación espontánea. La ventilación espontánea puede llevarse a cabo mediante la colocación de una «pieza T», es decir sin apoyo ventilatorio de ningún tipo otro que oxígeno o mediante ventilación en presión soporte en el cual el paciente inicia la ventilación. Los criterios con los cuales los pacientes demuestran tolerancia a la ventilación espontánea son: patrón respiratorio, adecuado intercambio de gases, estabilidad hemodinámica, y confort. La tolerancia a la pieza T al menos durante 30 a 120 minutos se considera adecuada para el retiro de la ventilación mecánica.<sup>8</sup>

### *Concepto de espacio muerto*

El espacio muerto es la parte del volumen corriente que no participa en el intercambio de gases. Aun-

que el concepto de espacio muerto pulmonar fue introducido hace más de cien años, el conocimiento actual y los avances técnicos recientes sólo han llevado a la adopción de la medición del espacio muerto como una herramienta de uso potencial al lado del paciente.<sup>9</sup>

La homogeneidad entre la ventilación y la perfusión determina el intercambio normal de gases. El concepto de espacio muerto se refiere a aquellas áreas pulmonares que son ventiladas pero no perfundidas. El volumen del espacio muerto (Vd) refleja la suma de dos componentes separados del volumen pulmonar:

1. La nariz, la faringe y las vías de conducción no contribuyen al intercambio de gases y frecuentemente son referidas como el Vd anatómico o el Vd de las vías aéreas (Vdaw).<sup>9</sup>
2. Los alvéolos bien ventilados pero que reciben un mínimo flujo sanguíneo corresponden al Vd alveolar (Vdalv).<sup>9</sup>

La ventilación mecánica agrega Vd como parte del equipo ventilatorio (tubo endotraqueal, dispositivos de humidificación y conectores). Este espacio muerto instrumental se considera parte del Vdaw. El espacio muerto fisiológico (Vfisio) está comprendido por el Vdaw (espacio muerto anatómico e instrumental) y el Vdalv, y se agrega a la ventilación mecánica como la porción del volumen corriente (Vt) o de la ventilación minuto que no participa en el intercambio de gases.<sup>9</sup>

El instrumento que mide las presiones parciales (PCO<sub>2</sub>) o la fracción (FCO<sub>2</sub>) de CO<sub>2</sub> durante el ciclo respiratorio es el capnógrafo. La ecuación para transformar la FCO<sub>2</sub> en PCO<sub>2</sub> es PCO<sub>2</sub> = FCO<sub>2</sub> multiplicada por la diferencia entre la presión barométrica menos la presión de vapor de agua. La capnografía basada en el tiempo expresa la señal de CO<sub>2</sub> como una función del tiempo y de ésta se grafican los valores de CO<sub>2</sub> inspiratoria media (método de la bolsa de Douglas) o del final de la inspiración (end tidal).<sup>9</sup>

La integración de la señal de volumen utilizando un sensor de flujo preciso (neumotacógrafo) y la señal de CO<sub>2</sub> (con un sensor de CO<sub>2</sub> muy rápido es conocida como capnografía volumétrica. Combinada con la medición de la PCO<sub>2</sub> arterial (PaCO<sub>2</sub>) es posible cuantificar precisamente la relación de Vdfisio a Vt.<sup>9</sup>

### *Curvas de capnografía en pacientes con ventilación mecánica*

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el gas más abundante producido por el cuerpo humano. El retiro

del CO<sub>2</sub> es el impulso primario para respirar y una motivación primaria para la ventilación mecánica de un paciente. La monitorización del CO<sub>2</sub> durante la respiración (capnografía) es un método no invasor, fácil de hacer, relativamente barato, y se ha estudiado extensamente.<sup>9</sup>

El capnograma es una representación gráfica de nivel de CO<sub>2</sub> exhalado, y refleja cambios fisiológicos y anatómicos.

### *Historia del capnograma*

En 1957, Smalhout usó capnogramas durante siete años y documentó 6,000 capnogramas y sus variaciones.<sup>9</sup> La descripción más temprana del capnograma volumétrico y de un método para determinar el espacio muerto fue en 1928.<sup>9</sup> En 1948, Fowler dividió la curva volumétrica del capnograma en 4 fases (I, II, III, y IV), buscando además una terminología con un significado claro de espacio muerto.<sup>9</sup>

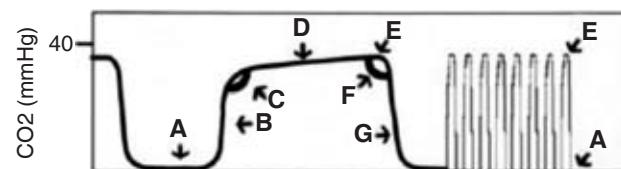
### *El capnograma normal*

Un capnograma es un trazo en el tiempo de la concentración de CO<sub>2</sub>. El capnograma tiene 2 velocidades grabadas, la velocidad rápida que es aproximadamente 12.5 mm/s, la cual permite interpretar cambios en un periodo de tiempo corto. La velocidad lenta es de aproximadamente 25 mm/min la cual permite identificar tendencias grandes. Los cambios en el capnograma sugieren cambios en la condición del paciente.<sup>9</sup>

La interpretación apropiada del capnograma puede alertar a un clínico a los cambios importantes y debe incluir por lo menos la evaluación de 3 características principales: La línea basal que comienza en cero, el aumento en la concentración del CO<sub>2</sub> y la meseta alveolar constante<sup>9</sup> (figura 1).

### *Utilidad del espacio muerto en diferentes escenarios clínicos*

La diferencia de la presión de CO<sub>2</sub> entre la sangre capilar pulmonar y el gas alveolar es usualmente pequeña en sujetos normales y el PCO<sub>2</sub> del final de la espiración es cercano a la PCO<sub>2</sub> alveolar y arterial.<sup>10</sup> El espacio muerto fisiológico es el determinante primario de la diferencia entre PCO<sub>2</sub> arterial y del final de espiración ( $\Delta\text{PCO}_2$ ) en pacientes con un sistema cardio-respiratorio normal.<sup>10</sup> Los pacientes con enfermedades cardiopulmonares tienen alteradas las relaciones ventilación/perfusión



**Figura 1.** Capnograma normal.

- A. Basal: representa el inicio de la espiración y debe iniciar en cero.
- B. La parte transicional de la curva representa el espacio muerto mezclado y el gas alveolar.
- C. El ángulo alfa representa el cambio a gas alveolar.
- D. La parte alveolar de la curva representa el promedio de la meseta de la concentración del gas alveolar.
- E. Valor del dióxido de carbono «end tidal» (CO<sub>2</sub>et)
- F. El ángulo beta representa el cambio a la parte inspiratoria del ciclo.
- G. La parte inspiratoria de la curva muestra una rápida disminución en la concentración de CO<sub>2</sub>.<sup>9</sup>

(V/Q) produciendo anormalidades en el Vd y en los cortocircuitos (shunt) intrapulmonares, afectando también el  $\Delta\text{PCO}_2$ .<sup>10</sup> Un  $\Delta\text{PCO}_2$  mayor de 5 mmHg se atribuye a anormalidades en la relación Vdfis/Vt y/o a un incremento en la mezcla venosa (la fracción del gasto cardiaco que pasa a través de los pulmones sin tomar oxígeno) o ambos. Un aumento en Vdfis/Vt es visto en pacientes normales cuando son anestesiados y puede atribuirse a la parálisis muscular, que causa una disminución en la capacidad residual funcional y altera la distribución normal de la ventilación y perfusión a través del pulmón.<sup>10</sup>

La ventilación a regiones que tienen poco o ningún flujo sanguíneo (baja PCO<sub>2</sub> alveolar) afecta el espacio muerto pulmonar. Los shunts aumentan Vdfis/Vt en la medida que el CO<sub>2</sub> venoso mixto de la sangre derivada eleva la PCO<sub>2</sub> incrementando el Vdfis/Vt por la fracción en que la PaCO<sub>2</sub> excede el PCO<sub>2</sub> capilar pulmonar no derivado. La Vdalv se aumenta en los estados de choque, durante la hipotensión pulmonar y sistémica, en la obstrucción de los vasos pulmonares (embolismo pulmonar masivo o microtrombosis), aún en ausencia de una disminución subsiguiente en la ventilación y bajo gasto cardiaco. La Vdaw aumenta por la sobredistensión pulmonar y por el espacio muerto adicional del equipo. Los tubos traqueales, intercambiadores de calor y humedad y otros conectores comunes pueden incrementar el espacio muerto del ventilador e inducir hipercapnia durante los bajos Vt o bajo volumen minuto.<sup>10</sup> Los cálculos del Vdaw incluyen el espacio muerto del ventilador. Dado que el espacio muerto anatómico permanece relativamente

constante, cuando el Vt es reducido hay una alta relación Vd/Vt.<sup>10</sup>

El efecto del PEEP resulta en una mejoría de la oxigenación al disminuir el Vdalv y por lo tanto hay una disminución del  $\Delta\text{PCO}_2$  arterial y del final de la inspiración, mientras que cuando existe sobredistensión, esta diferencia es mayor.<sup>11</sup>

#### Gradiente $\text{PaCO}_2$ - $\text{CO}_2\text{et}$ ( $\Delta\text{CO}_2$ )

En los sujetos sanos, el gradiente  $\text{PaCO}_2$ - $\text{CO}_2\text{et}$  es generalmente menor de 6 mmHg; el nivel de  $\text{CO}_2\text{et}$  es menor que el de  $\text{PaCO}_2$ . Esta diferencia está determinada porque el valor de  $\text{CO}_2\text{et}$  es la medición del  $\text{CO}_2$  de los alvéolos perfundidos y también de los no perfundidos; ya que estos últimos eliminan un gas con baja concentración de  $\text{CO}_2$ , lo cual diluye las altas concentraciones eliminadas por los alvéolos bien perfundidos.

Una disminución en el volumen minuto cardíaco se asocia con una disminución en la perfusión pulmonar, lo cual produce un aumento en el espacio muerto alveolar. Este aumento produce una disminución en  $\text{CO}_2\text{et}$  y un aumento en el gradiente  $\text{PaCO}_2$ - $\text{PetCO}_2$ .<sup>12</sup>

La medición de la fracción de espacio muerto en forma temprana en el curso de la falla respiratoria aguda puede dar información fisiológica importante.

#### *Medición del espacio muerto fisiológico con ecuación simplificada*

La medición del espacio muerto fisiológico (Vd/Vt) a través de la fracción Vd/Vt provee un valor pronóstico en diferentes escenarios en la UTI incluyendo retiro de la ventilación mecánica, además de medir la eficacia de la ventilación pulmonar basada en el bióxido de carbono.<sup>13</sup>

Sin embargo, la obtención de la medición del (Vd/Vt) es poco práctica a la cabecera del paciente dado que se requiere la medición por calorimetría indirecta.

Una ventilación eficiente empeora como resultado de una enfermedad pulmonar aguda o crónica; la discrepancia entre la producción de  $\text{CO}_2$  y la eliminación de  $\text{CO}_2$  se incrementa por diferencia en las mediciones de la  $\text{PaCO}_2$  y la presión parcial del bióxido de carbono espirado mixto (PECO<sub>2</sub>).<sup>13</sup>

Una ecuación simplificada para calcular el Vd/Vt es útil en la evaluación y el monitoreo de los pacientes en AMV.<sup>14</sup> El Vd/Vt se calcula mediante la ecuación de Bohr que es una modificación de la

ecuación de Enghoff, usando los siguientes parámetros:<sup>14</sup>

1. Ventilación minuto (VE; L/min):

$$\text{VE} = (\text{VE} [\text{BTPS}] / 1.2104)$$

Donde BTPS es la presión barométrica

2. Fracción espirada mixta de  $\text{CO}_2$  (FECO<sub>2</sub>):

$$\text{FECO}_2 = \text{Producción de bióxido de carbono}/\text{VE}$$

3. Concentración de  $\text{CO}_2$  espirada mixta (PECO<sub>2</sub>) (torr):

$$\text{PECO}_2 = ([\text{Presión barométrica} - 47] \times \text{FECO}_2);$$

4. Vd/Vt =  $(\text{PaCO}_2 - \text{PECO}_2) / \text{PaCO}_2$

Existe una ecuación simple para el espacio muerto que no requiere la medida de FECO<sub>2</sub>.<sup>14</sup>

Ecuación Frankenfield

$$\text{Vd/Vt} = 0.32 + 0.0106 (\text{PaCO}_2 - \text{CO}_2\text{et}) + 0.003 (f) + 0.0015 (\text{Edad})$$

f = Frecuencia respiratoria

Edad = Edad en años

$\text{PaCO}_2$  = Presión parcial de  $\text{CO}_2$  obtenida por gasometría

$\text{CO}_2\text{et}$  =  $\text{CO}_2$  al final de la exhalación obtenida por capnógrafo.<sup>10,14</sup>

El método validado para calcular el espacio muerto fisiológico (Vd/Vt) se basa en la ecuación de Enghoff-Bohr, sin embargo, el uso de esta ecuación requiere la colección sincronizada del gas usando una bolsa de Douglas o un monitor metabólico con calorimetría indirecta y por lo tanto no se encuentra accesible en la mayoría de las UTI o al menos en el momento del destete de la AMV.<sup>14</sup>

Por otro lado, la fórmula de Frankenfield incorpora variables que pueden alterar la relación Vd/Vt como son la  $\text{PaCO}_2$ ,  $\text{CO}_2\text{et}$ , frecuencia respiratoria, edad y temperatura.<sup>15</sup> Mediante la fórmula descrita por Frankenfield, es posible obtener el espacio muerto real en los pacientes en AMV. Se trata de una fórmula ya validada que no es utilizada cotidianamente y que proporciona datos confiables sin necesidad de calorimetría.<sup>10,15</sup>

#### OBJETIVO

Evaluar el Vd/Vt en pacientes bajo AMV prolongada en la UTI, mediante una nueva fórmula propuesta por Frankenfield.

Identificar el valor de Vd/Vt en todos los pacientes bajo AMV previo al retiro de ventilación mecánica y determinar cuál es el valor de referencia ante el cual existe riesgo de reintubación.

## Metodología

Los pacientes fueron ventilados con ventiladores Puritan Bennet 840®. Se obtuvieron datos demográficos (edad, sexo, escala de gravedad APACHE II, diámetro del tubo endotraqueal) y se utilizó la extensión Microstream® CO<sub>2</sub> para medición del CO<sub>2</sub>et por capnografía, la cual se obtiene de manera rápida (en 45 segundos) sin necesidad de calibración. Los valores se observaron en un monitor Philips® con la tecnología Microstream®.

Al momento de registrar el CO<sub>2</sub>et, se registró también paCO<sub>2</sub> y con la frecuencia respiratoria y edad del paciente se calculó el Vd/Vt mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Vd/Vt} = 0.32 + 0.0106 (\text{PaCO}_2 - \text{CO}_2\text{et}) + 0.003 (\text{f}) + 0.0015 (\text{Edad})$$

Se registró si se requirió traqueostomía, días de AMV y tiempo total de retiro. Se obtuvieron parámetros de mecánica respiratoria: fuerza inspiratoria (Pmax), volumen minuto (VE), volumen corriente (Vt), frecuencia respiratoria (f), índice de ventilación rápida superficial (VRS), distensibilidad estática y presión meseta. Se recolectaron también parámetros de intercambio gaseoso: PaO<sub>2</sub>/FIO<sub>2</sub>, PaCO<sub>2</sub> y cortocircuitos (QS/QT).

El total de pacientes se dividió en dos grupos:

Grupo 1: pacientes retirados con éxito de la AMV y Grupo 2: Pacientes que fracasaron al retiro de la AMV o que tuvieron que ser reintubados.

El criterio para considerar un «retiro exitoso» fue estar extubado por un tiempo mayor de 72 horas. El criterio que se utilizó para considerar «fracaso» fue la necesidad de reintubación antes de 72 horas o mortalidad durante el retiro.

Los valores tomados como referencia para considerar el inicio del retiro de la AMV y extubación, así como las unidades en las que se expresan se encuentran en el *cuadro I*.

Las variables categóricas fueron descritas usando frecuencias y porcentajes [n (%)], mientras que las numéricas se expresan con promedio y desviación estándar ( $x \pm DE$ ) si la distribución era normal. Las comparaciones entre grupos se realizó con prueba chi cuadrada o exacta de Fisher para variables categóricas y con prueba *t* de Student o U Mann-Whitney para variables numéricas según corresponda. Se consideró estadísticamente significativo si  $p < 0.05$ .

Se calculó sensibilidad y especificidad, así como valor predictivo positivo y negativo de cada índice utilizado.

**Cuadro I. Índices predictivos de la evolución del retiro de la asistencia ventilatoria.**

Índice	Punto de corte	Sensibilidad	Especificidad
Ventilación minuto espontánea (VE)	$\leq 15 \text{ L/min}$	0.78	0.18
Frecuencia respiratoria espontánea (f)	$\leq 38/\text{min}$	0.92	0.36
Volumen corriente espontánea (Vt)	$\geq 325 \text{ mL}$	0.97	0.54
Presión inspiratoria máxima (Pmax)	$\leq 15 \text{ cmH}_2\text{O}$	1.00	0.11
Distensibilidad dinámica	$\geq 22 \text{ mL/cm H}_2\text{O}$	0.72	0.50
Distensibilidad estática	$\leq 33 \text{ mL/cm H}_2\text{O}$	0.75	0.36
PaO <sub>2</sub> /PAO <sub>2</sub>	$\geq 0.35$	0.81	0.29
Respiración rápida superficial f/Vt	$\leq 105$	0.97	0.64
Índice CROP	$\geq 13 \text{ mL/f/min}$	0.81	0.57

## RESULTADOS

### Grupo total

Se estudiaron 50 pacientes en AMV, con edad promedio  $52 \pm 23$  años (con un rango de 17 a 82); 22 pacientes del género masculino (58%) y 16 pacientes del género femenino (42%); 10 pacientes (20%) tuvieron lesión pulmonar aguda; hubo necesidad de traqueostomía en 10 pacientes (20%). El tubo orotraqueal más utilizado fue de 8 mm y el tiempo promedio que los pacientes estuvieron en AMV fue de  $10 \pm 5$  días (rango de 5 a 28). El tiempo requerido para el retiro de la AMV fue de  $4 \pm 2$  días (2 a 8). El Vd/Vt promedio calculado fue de  $0.52 \pm 0.06$  con un rango de (0.41 a 0.67). La mediana de escala de Glasgow fue 15 (rango intercuartílico 25-75 de 15-15); con una escala de APACHE II a su ingreso de  $8 \pm 5$  (1 a 23), la mortalidad del grupo total fue de 7 pacientes (14%).

Lo anterior se observa en el *cuadro II*. Las complicaciones se observan en la *figura 2*.

El destete fue exitoso en 80% de los pacientes ( $n = 38$ ) del grupo total y el fracaso se presentó en 20% de los pacientes.

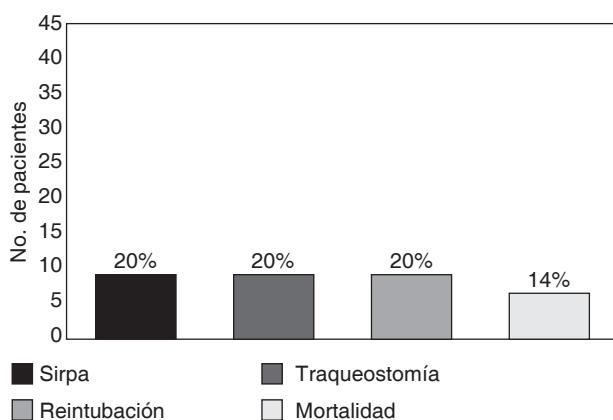
Una vez que se dividieron los pacientes con respecto a éxito o fracaso se encontró lo siguiente:

### Grupo 1, extubado exitosamente

Se lograron extubar 38 pacientes (80%), con una edad promedio de  $52 \pm 22$  (rango de 17 a 87);

**Cuadro II. Demográficos en el grupo total.**

Demografía	
Edad (Años)	53 ± 22
Días de retiro en AMV	4 ± 2
Días en AMV	11 ± 6
Días de estancia en UTI	18 ± 9
APACHE II	8 ± 5.2
Escala de coma de Glasgow	15

**Figura 2. Complicaciones presentadas.**

de éstos, 16 fueron mujeres (42%) y hombres 22 (58%); 7 de ellos (18%) tuvieron SIRPA, y únicamente 3 pacientes requirieron traqueostomía (7%). El tubo endotraqueal más utilizado fue de 8 mm y los días en AMV fueron  $8 \pm 5$  (rango de 5 a 22); el tiempo de retiro de la AMV fue de  $3 \pm 1$  (2 – 8). El promedio de días de estancia en UTI fue de  $16 \pm 9$  días (rango: 2 a 8). La mediana de escala de Glasgow fue 15 (rango intercuartilar 25-75 de 15 – 15) puntos y tuvieron un promedio de escala de APACHE II de  $6.7 \pm 3.7$  (1 – 18). El Vd/Vt calculado fue de  $0.50 \pm 0.05$  (con un rango de 0.41 a 0.67) y una  $p < 0.0001$ , con respecto al grupo de los que fracasaron. Los valores estadísticamente significativos además del Vd/Vt fueron: frecuencia respiratoria, Pmax, distensibilidad estática, PaCO<sub>2</sub> y Δ de CO<sub>2</sub>.

#### Grupo 2, fracaso al retiro de la AMV

Estuvo constituido por 10 pacientes, y la edad promedio fue de  $57 \pm 19$  (23 – 77). De ellos, 4 fueron mujeres (40%) y 6 hombres (60%); 3 de ellos tuvieron diagnóstico SIRPA (30%), 7 pacientes requirieron traqueostomía (70%). El tubo endotraqueal

**Cuadro III. Demográficos al dividir a los pacientes en éxito y fracaso.**

	Éxito n = 38	Fracaso n = 10	p
Mujeres	16 (80%)	4 (20%)	NS
Hombres	22 (80%)	6 (20%)	NS
Edad (en años)	53 + 23	57 + 19	NS
Escala de coma de Glasgow (mediana e intercuartilar 25-75)	15 (15 – 15)	15 (15 - 15)	NS
Tiempo de retiro en días	$3 \pm 1$	$5 \pm 2$	< 0.008
Tiempo en AMV (días)	$8 \pm 5$	$19 \pm 6$	< 0.0001
Días de estancia en UTI	$17 \pm 4$	$25 \pm 8$	< 0.0001
Presencia de SIRPA	7 (18%)	3 (3%)	NS
Utilización de traqueostomía	3 (18%)	7 (70%)	< 0.0001
APACHE II	$6.7 \pm 3.7$	$12.9 \pm 7.2$	< 0.0001
Mortalidad	2 (5.3%)	5 (50%)	0.002

más utilizado fue de 8 mm, mientras que los días de AMV fueron  $19 \pm 6$  (con un rango de 10 a 28). El tiempo de retiro de la AMV fue de  $5 \pm 2$  (rango de 3 a 8). El promedio de días de estancia en UTI fue  $25 \pm 8$  días. La mediana de escala de Glasgow fue 15 (rango intercuartilar 25 – 75 de 15 – 15) puntos, con una escala de APACHE II  $12.9 \pm 7.2$  (1 – 23). El Vd/Vt calculado en este grupo fue de  $0.59 + 0.53$  (con un rango de 0.52 a 0.67) (*cuadros III y IV*).

En el *cuadro V* observamos los valores predictivos positivos (VPP) y negativos (VPN) así como la sensibilidad y especificidad de los parámetros analizados. Se obtuvo sensibilidad y especificidad así como VPP y VPN de los siguientes parámetros tomando como punto de corte, los estandarizados y referidos en el *cuadro I*. Estos valores son considerados normales y en base a ellos se obtuvo la sensibilidad, especificidad, VPP y VPN en nuestros pacientes.

La literatura reporta puntos de corte para el Vd/Vt de 0.65, sin embargo, en nuestro grupo observamos que este punto de corte no discriminaba de forma adecuada quienes podían ser extubados exitosamente y quienes no, al menos en nuestros pacientes. Decidimos realizar el mismo análisis (sensibilidad, especificidad, VPP y VPN) para diferentes puntos de corte y encontramos lo referido en el *cuadro VI*.

#### DISCUSIÓN

En este trabajo evaluamos la utilidad de la medición del espacio muerto y el éxito obtenido

**Cuadro IV. Resultados ventilatorios en ambos grupos.**

	Éxito	Fracaso	P
Volumen minuto	9.3 ± 3	10.1 ± 2.11	NS
Volumen corriente	433 ± 131	401 ± 84.1	NS
Frecuencia respiratoria	21.5 ± 6.4	32 ± 3.6	< 0.0001
Fuerza inspiratoria máxima	-32.5 ± -9.1	-22.2 ± -8.6	< 0.002
VRS	63.9 ± 31.2	73 ± 31	NS
Distensibilidad estática	44.2 ± 11.7	31.4 ± 12.8	< 0.004
PaCO <sub>2</sub>	37.3 ± 5.2	45.1 ± 12.4	< 0.004
Vd/Vt	0.50 ± 0.057	0.59 ± 0.53	< 0.001
Presión plateau	19.8 ± 8.2	18.7 ± 4.9	NS
PaO <sub>2</sub> /FIO <sub>2</sub>	310 ± 110	320 ± 120	NS
Qs/Qt	10.2 ± 2.1	11.2 ± 2.1	NS
Delta CO <sub>2</sub>	4.3 ± 3.6	8.6 ± 6	< 0.006

NS = no significativo

**Cuadro V. Sensibilidad, especificidad, valor predictivo positivo y valor predictivo negativo, para diferentes predictores de destete.**

Índice	Sensibilidad	Especificidad	VPP	VPN
Volumen minuto (< 15)	0	0.86	0	0.67
Frecuencia respiratoria (< 38)	1	0	0.21	0
Volumen corriente (> 325)	0.33	0.71	0.33	0.71
Fuerza inspiratoria máxima (> -15)	0	1	0	0.7
Distensibilidad estática (> 22)	0.33	0.71	0.33	0.71
VRS (< 105)	0.33	1	1	0.78
Delta CO <sub>2</sub> (< 6)	0.67	0.71	0.50	0.83
Vd/Vt (0.55)	0.55	0.80	0.62	0.94

**Cuadro VI. Observamos la sensibilidad, especificidad, valor predictivo positivo y valor predictivo negativo para los diferentes puntos de corte de Vd/Vt.**

Vd/Vt	Sensibilidad	Especificidad	VPP	VPN
0.45	1	0.08	0.22	1
0.5	1	0.37	29	1
0.55	0.8	0.87	0.62	0.94
0.6	0.3	0.92	0.5	0.83

posterior a la extubación. Durante las últimas dos décadas los intensivistas hemos tratado de identificar aplicaciones para Vd/Vt, como una herramienta para identificar embolismo pulmonar, monitorear la administración de fluidos a pacientes asmáticos intubados y midiendo los efectos de los broncodilatadores en pacientes con EPOC. Inicialmente, Vd/Vt fue medido por recolección del gas espirado y posteriormente mediante cur-

vas de espiración de bióxido de carbono por capnografía. Otras circunstancias donde puede ser útil el cálculo del Vd/Vt son el estado de choque y la insuficiencia respiratoria. Se ha establecido que cuando la relación del Vd/Vt se encuentra en cifras de más de 0.65 existen posibilidades elevadas de no poder retirar a los pacientes de la AMV. No hay muchos datos con respecto a las cifras de este en AMV prolongada.

Frankenfield y colegas desarrollaron y validaron recientemente una fórmula para el cálculo del Vd/Vt en pacientes críticos bajo AMV, la cual utilizamos en nuestros pacientes que estuvieran listos para retirar del ventilador para encontrar si puede o no utilizarse en nuestra población y con qué cifras, determinar la probabilidad de éxito o fracaso.

Determinar el momento apropiado para retirar la ventilación mecánica es frecuentemente una decisión clínica, a veces subjetiva basada en la experiencia y en el juicio del médico, por lo que numerosos indicadores se han propuesto para tratar de encontrar valores objetivos y ayudar a dicha decisión.

El fracaso encontrado en el retiro de la AMV de nuestros pacientes es del 20%, semejante a lo reportado en la literatura. La decisión para extubar se basó en parámetros utilizados de forma cotidiana, a veces incluyendo el VRS, la Pimax y el estado clínico la mayoría de las veces. No suele utilizarse el Vd/Vt para tomar la decisión de iniciar el destete.

Durante nuestro estudio medimos el Vd/Vt calculado mediante la fórmula de Frankenfield y llama la atención que los valores son de alrededor de 0.52, cifra que se encuentra por arriba del estado fisiológico reportado como normal de 0.3. Sin embargo, cuando el paciente se encuentra en AMV existen múltiples factores que pueden incrementarlo: cuando se agrega PEEP existe aumento del volumen pulmonar con tracción radial resultante sobre las vías aéreas, aumentando así el espacio muerto. Además la mayor presión de las vías aéreas tiende a desviar el flujo sanguíneo de las regiones ventiladas, creándose regiones de gran ventilación y pobre perfusión, esto es más probable que suceda en las regiones superiores pulmonares cuando la presión de la arteria pulmonar es relativamente baja por efecto hidrostático. Es sabido que si la presión de los capilares desciende por debajo de la presión de las vías aéreas, los capilares pueden colapsarse completamente, provocando la falta de la perfusión pulmonar.

Por otro lado, observamos que los pacientes que fracasaron en el retiro de la AMV tenían un Vd/Vt de alrededor de 0.59 mientras que los que fueron exitosos, tuvieron cifras de 0.5. Estadísticamente hay diferencia importante. Es importante mencionar que los reportes de la literatura utilizan puntos de corte de 0.65 mientras que nosotros encontramos que niveles más bajos, es decir a 0.55 podemos discriminar con mayor precisión quiénes se pueden extubar y en quiénes no.

El punto de corte para Vd/Vt reportado en la literatura indica que hay fracaso posterior al retiro de la ventilación mecánica cuando es mayor de 0.65; sin embargo en esta población de pacientes encontramos diferentes puntos de corte en el cual el valor de referencia de 0.55 indica una sensibilidad de 80%, especificidad de 87%, un valor predictivo positivo de 62% y valor predictivo negativo de 94%, por lo cual este valor se tomó como referencia ya que fue el mejor índice de predicción de fracaso.

Lo anterior expresa de manera clara que el Vd/Vt es de los índices más confiables para pronosticar fracaso al retirar a un paciente de AMV cuando el punto de corte es de 0.55.

El inconveniente más importante de la medición del Vd/Vt con calorimetría indirecta es que a menos que se tenga el equipo específico, su medición es difícil y laboriosa; sin embargo sabemos que a medida que se reconoce la necesidad de contar con calorímetros en las unidades de cuidados críticos para el mejor manejo de los pacientes, en forma simultánea también podremos tener a nuestra disposición la medición del espacio muerto como un índice de ayuda útil en el retiro de la AMV.

Nosotros proponemos y utilizamos un nuevo método ya validado en el cual por medio de una fórmula y el valor de  $\text{CO}_2\text{et}$  obtenido con una curva de capnografía disponemos del Vd/Vt a la cama del paciente y sin necesidad de personal adicional para la toma de la misma. No se pretende desplazar o sustituir a ninguno de los índices o parámetros ampliamente estudiados y citados en la literatura y no significa que encontrar en un Vd/Vt mayor de 0.55 establezca como imposible retirar a un paciente de AMV, sino que la metodología del retiro debe ser bien planeada y reevaluarse día a día.

Un inconveniente, de orden funcional es que la medición del Vd/Vt no diferencia entre espacio muerto anatómico y alveolar, como tampoco lo hace entre cambio del propio espacio muerto y desequilibrio entre la relación ventilación/perfusión, por lo que esta medición deberá analizarse conjuntamente con otras variables fisiológicas y un correcto juicio clínico.

Se requieren más estudios para evaluar si la medición continua de los diferentes capnógrafos son útiles para la identificación y estratificación del riesgo, y para seguir los efectos de una intervención terapéutica durante el curso de la enfermedad en pacientes críticamente enfermos.

## CONCLUSIONES

La medición del Vd/Vt mediante la fórmula de Frankenfield es una herramienta útil de ayuda para predecir éxito al retiro de la ventilación mecánica cuando se toma como valor de referencia la cifra de 0.55.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alia I, Esteban A. Weaning from mechanical ventilation. *Critical Care* 2000;4(2):72-80.
2. Afessa B, Hogans L, Murphy B. Predicting 3-day and 7-day outcomes of weaning from mechanical ventilation. *Chest* 1999;116:456-461.
3. Esteban A, Alía I, Ibáñez J, et al. Modes of mechanical ventilation and weaning. A national survey of Spanish hospitals. *Chest* 1994;106:1188-1193.
4. MacIntyre NR. Evidence based guidelines for weaning and discontinuing ventilatory support. *Chest* 2001;120:375-396.
5. Meade M, Guyatt G, Cook D, et al. Predicting success in weaning from mechanical ventilation. *Chest* 2001;120:400S-424S.
6. Sahn SA, Lakshminarayan S. Bedside criteria for discontinuation of mechanical ventilation. *Chest* 1973;63:1002-1005.
7. Yang KL, Tobin MJ. A prospective study of indexes predicting the outcome of trials of weaning from mechanical ventilation. *New England Journal Med* 1991;324:1445-1450.
8. Lucangelo U, Blanch L. Dead space. *Intensive Care Med* 2004;30:576-579.
9. Thompson JE. Capnographic waveforms in the mechanically ventilated patient. *Respiratory Care* 2005;50:100-108.
10. Frankenfield DC, et al. Predicting dead space ventilation in critically ill patients using clinically available data. *Critical Care Med* 2010;38:288-291.
11. West JB. *Ventilación mecánica, fisiopatología pulmonar. Conceptos fundamentales*. 2da ed, Argentina 1982:169-180.
12. Tyburski JG, Carlin AM, Harvey EH. End-tidal CO<sub>2</sub>- arterial CO<sub>2</sub> differences: a useful intraoperative mortality marker in trauma surgery. *Journal of Trauma* 2003;55:892-896.
13. Nuckton TJ, Alonso JA, Kallet RH, et al. Pulmonary dead space fraction as a risk factor for death in the acute respiratory distress syndrome. *New England J Med* 2002;346:1281-1286.
14. Fletcher R, Johnson B, Cumming G, et al. The concept of dead space with special reference to the single breath test for carbon dioxide. *Br J Anesthesia* 1981;53:77-88.

### Correspondencia:

Dra. Carolina Magaña Macías.

The American British Cowdray Medical Center IAP.  
Sur 136 Núm. 116, Colonia Las Américas, Delegación  
Álvaro Obregón 01120. México Distrito Federal. Telé-  
fono: 5552308000. Extensión 8594.  
[dracaritomm@hotmail.com](mailto:dracaritomm@hotmail.com)