

Utilidad de la tonometría por aire en el diagnóstico de la isquemia intestinal experimental

J. de Tomás, F. Turégano, A. Bardina* y J. Perea.

Sección de Cirugía de Urgencias. *Departamento de Anestesiología y Reanimación.
Hospital General Universitario Gregorio Marañón. Madrid.

Resumen

Introducción. La utilidad del tonómetro por aire en el estudio de la isquemia del tubo digestivo está siendo evaluada en los últimos años. Su principio básico consiste en medir la PCO₂ del aire que hay en una sonda colocada en el interior de una víscera hueca, asumiendo que dicho valor equivale a la presión regional de CO₂ (PrCO₂). Con ella se puede calcular el pH intramucoso (pHi) del órgano estudiado. El objetivo de este trabajo es comprobar la fiabilidad del tonómetro aéreo en diversas situaciones de isquemia intestinal.

Material y métodos. Se ha desarrollado un modelo experimental con cerdos “mini-pig” entre 40 y 60 kg de peso distribuidos en 3 grupos diferentes: grupo A, (n = 4) pinzamiento total de la arteria mesentérica superior (AMS) durante 1 h con tonometría gástrica e intestinal realizada al mismo tiempo; grupo B (n = 4), pinzamiento total de la AMS durante 2 h con tonometría intestinal exclusivamente, y grupo C (n = 5), pinzamiento parcial (30% de flujo residual) de la AMS durante 3 h con tonometría intestinal. La reducción parcial del flujo en la AMS se cuantificó mediante una sonda perivascular conectada a un medidor de flujo por ultrasonidos. En el análisis estadístico de los resultados se aplicó el test de Friedman.

Resultados. En el grupo A no hubo cambios significativos de los parámetros gástricos analizados a lo largo del tiempo ($p > 0,1$); sin embargo, el tonómetro intestinal sí detectó cambios casi significativos ($p = 0,05$) con respecto al pHi, PrCO₂ y GAP. En el grupo B se observaron resultados similares con el tonómetro intestinal alcanzando en la mayoría de los cerdos el valor máximo detectable de PrCO₂ al final de la primera hora. En el grupo C las diferencias fueron casi significativas ($p = 0,07$) y el pHi intestinal se estabilizó durante la última hora.

Correspondencia: Dr. J. de Tomás Palacios.
C/ Fuencarral, 22 2.^o interior A. 28004 Madrid.

Aceptado para su publicación en mayo de 2001.

Conclusiones. La utilidad de la tonometría gástrica por aire en el diagnóstico precoz de la isquemia intestinal resulta significativamente inferior si se compara con la tonometría intestinal. La tonometría por aire es capaz de medir sensiblemente los cambios en la PrCO₂ del tubo digestivo hasta alcanzar los valores máximos cuantificables por este aparato. La tonometría aérea puede ser aplicada clínicamente para detectar de forma temprana condiciones de bajo flujo en vísceras huecas.

Palabras clave: Tonometría aérea. Isquemia intestinal. pH intramucoso. Cerdos. Monitorización.

(Cir Esp 2001; 70: 129-132)

UTILITY OF AIR TONOMETRY IN THE DIAGNOSIS OF EXPERIMENTAL INTESTINAL ISCHEMIA

Introduction. In the last few years, the utility of air tonometry in the study of digestive tube ischemia has been evaluated. This technique is based on measuring the PCO₂ of the air in the catheter inserted inside a hollow viscera, assuming that the value obtained equals the regional CO₂ pressure (PrCO₂). Using this pressure, the intramucular pH (pHi) of the organ under study can be calculated. The aim of this study was to evaluate the reliability of air tonometry in different situations of intestinal ischemia.

Material and methods. We developed an experimental model with mini-pigs, weighing between 40 and 60 kg. The pigs were divided into three groups: group A (n = 4) underwent total clamping of the superior mesenteric artery for 1 hour and simultaneous gastric and intestinal tonometry; group B (n = 4) underwent total clamping of the superior mesenteric artery for 2 hours and intestinal tonometry only, and group C (n = 5) underwent partial clamping (30% residual flow) of the superior mesenteric artery for 3 hours and intestinal tonometry. The partial reduction of flow in the superior mesenteric artery was quantified by a perivascular catheter connected to an ultrasound flow measuring device. Friedman's test was used to analyze the results.

Results. In group A no significant changes in the gastric parameters analyzed were found throughout the time period ($p > 0.1$). However, intestinal tonometry detected nearly significant changes ($p = 0.05$) in pH_i, PrCO₂ and GAP. Similar results were observed in group B; in most of the pigs intestinal tonometry reached the maximum detectable value of PrCO₂ at the end of the first hour. In group C the differences were almost significant ($p = 0.07$) and intestinal pH_i stabilized in the final hour.

Conclusions. The utility of gastric air tonometry in the early diagnosis of intestinal ischemia is significantly lower than that of intestinal tonometry. Air tonometry is able to sensitively measure changes in the PrCO₂ of the digestive tube until reaching the maximal values quantifiable by this device. Air tonometry may be clinically used in the early detection of conditions of low flow in hollow viscera.

Key words: Air tonometry. Intestinal ischemia. Intramucosal pH. Pigs. Monitoring.

Introducción

El diagnóstico precoz de la isquemia intestinal es un factor muy importante para el pronóstico vital del paciente. Tanto en los casos de un flujo esplácnico comprometido por situaciones de bajo gasto (isquemia no oclusiva) o de fenómenos tromboembólicos (isquemia oclusiva), la evolución natural del proceso puede conducir a una necrosis intestinal más o menos extensa. Entre los procedimientos diagnósticos actuales ha aparecido la tonometría digestiva aérea que mide la presión parcial de CO₂ en la luz intestinal. Cuando acontece una disminución importante en el flujo tisular, se origina un incremento en la presión regional de CO₂ (PrCO₂)^{1,2}. Hasta mediados de la década de los noventa, los tonómetros utilizaban suero salino como medio de intercambio entre el CO₂ de la mucosa digestiva y la sonda de tonometría^{3,4}. Según Fididian-Green, el pH intramucoso (pH_i) del tubo digestivo se podía hallar sustituyendo la PrCO₂ y el HCO₃⁻ en la ecuación de Henderson-Hasselbach⁵. El tonómetro de suero salino planteaba serios inconvenientes metodológicos, y fue en dicho contexto donde surgieron los primeros trabajos en los que se utilizó el aire como medio para calcular la PrCO₂ dentro del estómago^{6,7}. Estos esfuerzos han culminado con el desarrollo de un tonómetro por aire, capaz de medir la PCO₂ de la sonda mediante un sensor de rayos infrarrojos que actúa automáticamente a intervalos regulares de tiempo^{8,15}.

Las indicaciones de la tonometría digestiva se están asentando en los pacientes ingresados en las unidades de cuidados intensivos (UCI)^{10,16}, cirugías cardíacas con circulación extracorpórea^{17,18}, operaciones de aorta abdominal con riesgo de isquemia en el territorio de la arteria mesentérica inferior¹⁹, etcétera.

Como fase preliminar de un estudio farmacológico sobre la isquemia intestinal experimental, hemos querido comprobar la fiabilidad del tonómetro aéreo con sondas situadas tanto en el estómago como en el intestino del-

gado en diversas situaciones de pinzamiento de la arteria mesentérica superior (AMS).

Material y métodos

Hemos desarrollado un modelo experimental utilizando 13 cerdos de raza "mini-pig", de 40-60 kg de peso, distribuidos en 3 grupos diferentes: en el grupo A ($n = 4$) se llevó a cabo una oclusión total de la AMS durante 1 h, realizando mediciones gástricas e intestinales simultáneas con el tonómetro aéreo; en el grupo B ($n = 4$) también se procedió a una oclusión total de la AMS, aumentando el tiempo a 2 h, con mediciones tonométricas intestinales; en el grupo C ($n = 5$) se realizó una oclusión parcial de la AMS (flujo residual del 30%) durante 3 h con mediciones tonométricas en el intestino.

Técnica quirúrgica

Los animales eran sometidos a la inducción anestésica con ketamina i.m. (Ketolar®, Parke Davis S.L.), 5 mg/kg, y pentobarbital sódico i.v. (Pentotal®, Abbott S.A.), 10-15 mg/kg. Posteriormente, tras la intubación orotraqueal, se conectaba el cerdo a un ventilador mecánico (Boylemodular®, Boc Medishield, Reino Unido) a 10-12 ciclos/min, un volumen tidal de 4-l/min y un porcentaje de oxígeno del 40-50%, y se continuaba con una perfusión de propofol (Diprivan® 2%; Zeneca Farma S.A.) a 11 mg/kg/h. La temperatura corporal era mantenida entre 36 y 37 °C gracias a la ayuda de una manta térmica. Seguidamente, mediante una técnica abierta se cateterizaban la arteria femoral, la vena femoral y la vena yugular interna. La arteria femoral era utilizada para conseguir las muestras de sangre arterial y registrar la presión arterial. A través de la vena femoral se introducía un catéter de Swan-Ganz para el cálculo de parámetros hemodinámicos. El catéter situado en la vena yugular servía para mantener una infusión de cristaloides adecuada y obtener muestras de sangre venosa.

Después se realizaba una laparotomía media xifopubiana, colocando en los 3 grupos una sonda de tonometría de 18 F (TRIP® Tonometry Catheter; Datex Engstrom Division, Instrumentarium Corp., Finlandia) a través de una enterotomía en el ileón a 25 cm de la válvula ileocecal. En el grupo A se introducía también una sonda similar en el antró gástrico mediante una gastrostomía. Las sondas de tonometría eran conectadas al tonómetro por aire (Tonocap® monitor; Datex Ohmeda Division, Instrumentarium Corp., Finlandia) cuyo rango de medición de PrCO₂ oscila entre 0 y 107 mmHg, siendo su tiempo de calibrado inicial próximo a los 15-20 min. Posteriormente, se procedía a disecar 2 cm de la AMS en su origen tras elevar el cuerpo y la cola del páncreas. En este segmento arterial se situaba una sonda perivascular de 8 mm (Transonic Systems, Ithaca, NY) conectada a un medidor de flujo Doppler (T106®; Transonic Systems, Ithaca, NY) y un torniquete graduable proximal a dicha sonda. Finalmente, la AMS era ocluida de forma total o parcial, controlando el flujo residual mediante el Doppler. Un vez finalizadas las mediciones convenientes, el animal era sacrificado con un bolo de CIK i.v. al terminar el período de isquemia.

En el análisis estadístico se utilizó la prueba no paramétrica de Friedman para evaluar los cambios en las diversas variables (pH_i, PrCO₂ y GAP) durante los sucesivos intervalos de tiempo de isquemia.

Resultados

En la tabla 1 aparecen las medias de los valores gástricos e intestinales de pH_i, PrCO₂ y GAP (PrCO₂-PartCO₂) obtenidos en los animales del grupo A. Aunque sí se observa un ligero incremento en la PrCO₂ gástrica durante la primera media hora, ésta permaneció invariable en la media hora siguiente y los resultados carecen de significación estadística ($p > 0.1$). En la misma tabla se detallan los valores alcanzados por los distintos parámetros con la sonda de tonometría en el intestino. Aplicando el test de Friedman, todos ellos se situaron muy próximos a un valor de $p = 0.05$, alcanzando significación estadística

TABLA 1. Resultados del tonómetro aéreo en el grupo A (isquemia total durante 1h)

	T = 0	T = 30	T = 60	P
PrCO ₂ gástrico	45,5	53,75	53,2	p = 0,420
GAP gástrico	9,7	15,2	14	p = 0,472
pHi gástrico	7,34	7,25	7,25	p = 0,105
PrCO ₂ intestinal	38,2	100	107	p = 0,060
GAP intestinal	-1,7	58	82	p = 0,050
pHi intestinal	7,45	6,98	6,87	p = 0,050

T: tiempo en minutos; PrCO₂: presión regional de CO₂ (mmHg); pHi: pH intramucoso; GAP: PCO₂ arterial-PrCO₂.

a pesar del reducido tamaño de la muestra. La figura 1 ilustra las variaciones del pHi gástrico e intestinal en este grupo. En el grupo B se confirmó que la mayoría de los cerdos superaban el límite de medición de PrCO₂ del Tonomap al finalizar la primera hora de isquemia total, resultando poco fiables los hallazgos tonométricos durante la segunda hora (tabla 2).

Finalmente, el grupo C presentó una disminución moderada del pHi intestinal hasta las 2 h de isquemia parcial donde parecía estabilizarse. Los cambios en los parámetros intestinales también se encontraron cercanos a una p = 0,05 (tabla 3). Aunque no se reflejen en las tablas, los valores del pH arterial sí disminuyeron significativamente durante los períodos de oclusión completa de la AMS, pero de una forma más suave que la apreciada en la mucosa intestinal. Sin embargo, no hubo alteración significativa del pH arterial cuando los animales fueron sometidos a una limitación parcial en el flujo de la AMS.

Discusión

Desde que Bergofsky calculara en 1964 la PO₂ y la PCO₂ en la pared de varios órganos huecos a través de suero salino instilado en el interior de los mismos²⁰, se han publicado numerosos trabajos sobre tonometría en el campo de la hipoperfusión visceral, habida cuenta del aumento local de CO₂ que se produce a consecuencia del metabolismo anaerobio y del déficit de eliminación de CO₂. La tonometría gástrica como indicador de condiciones de bajo flujo visceral es un método fiable y sencillo que puede tener repercusiones en el manejo terapéutico de los pacientes graves¹⁶.

Las aplicaciones de la tonometría digestiva para evaluar la isquemia selectiva en el territorio de la AMS no están bien delimitadas. Algunos autores afirman que el pHi gástrico es un buen parámetro para diagnosticar la isquemia intestinal²¹. En 1987, Poole publicó un trabajo experimental en perros donde se ocluía exclusivamente, en diversos grados, el tronco celíaco y la AMS³. Al mismo tiempo, realizaba mediciones en el estómago, yeyuno y colon descendente utilizando el clásico tonómetro de suero salino. El pHi descendió tanto en el estómago como en el yeyuno, pero permaneció invariable en el colon izquierdo, en el que no se limitó su flujo a través de la arteria mesentérica inferior. Como consecuencia de la disminución de la irrigación gástrica a través del tronco celíaco, resulta imposible valorar si la tonometría gástrica,

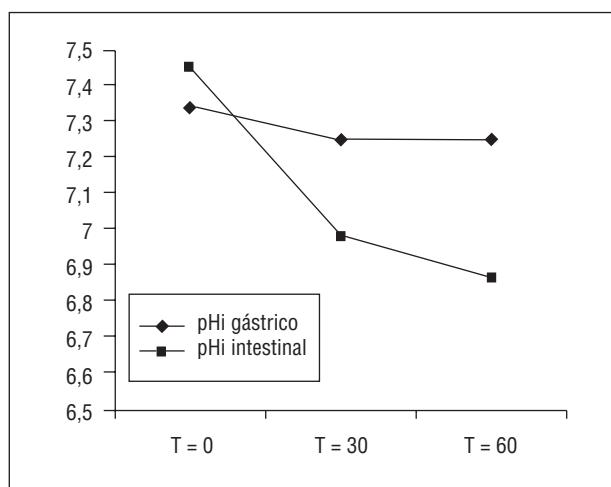


Fig. 1. En el grupo A, donde se realizó una oclusión completa de la AMS durante una hora, se observa una disminución mantenida del pHi intestinal (p = 0,05), pero el pHi del estómago no ofrece los mismos resultados (p = 0,10). T: tiempo en minutos; pHi: pH intramucoso.

TABLA 2. Resultados del tonómetro aéreo en el grupo B (isquemia total durante 2 h)

	T = 0	T = 60	T = 120
PrCO ₂ intestinal	47	95	107
GAP intestinal	4,0	64,0	88,3
pHi intestinal	7,42	7,01	6,92

T: tiempo en minutos; PrCO₂: presión regional de CO₂ (mmHg); pHi: pH intramucoso; GAP: PCO₂ arterial-PrCO₂.

TABLA 3. Resultados del tonómetro aéreo en el grupo C (isquemia parcial durante 3 h)

	T = 0	T = 60	T = 120	T = 180	P
Flujo AMS	0,34	0,11	0,10	0,11	
GAP intestinal	23,0	44,6	51,0	46,0	p = 0,074
PrCO ₂ intestinal	49,6	73,6	81,3	78,3	p = 0,072
pHi intestinal	7,29	7,11	7,07	7,08	p = 0,072

T: tiempo en minutos, flujo AMS: l/min; PrCO₂: presión regional de CO₂ (mmHg); pHi: pH intramucoso; GAP: PCO₂ arterial-PrCO₂.

ca, de fácil acceso en la clínica, podría detectar isquemias mesentéricas agudas. Campbell et al exploraron en 1999 la fiabilidad de la tonometría gástrica en el diagnóstico de la isquemia intestinal en cerdos recién nacidos²², pero para desencadenar la isquemia emplearon adrenalina sistémica. Este potente fármaco adrenérgico produce vasoconstricción generalizada en todo el lecho esplácnico y, por tanto, dicho modelo se asemeja más a una condición de shock con bajo gasto que a un tromboembolismo en el territorio de la AMS. La medición de la PrCO₂ intestinal en modelos experimentales de oclusión selectiva de la AMS sí ofrece resultados interesantes¹, aunque su aplicabilidad en el diagnóstico precoz de la isquemia mesentérica parece complicada, ya que el acceso al intestino delgado mediante una sonda de tonometría no es sencillo.

En el grupo A, el pH gástrico disminuyó de forma irregular y el pH intestinal fue el que demostró una mejor correlación con el grado y el tiempo de isquemia (fig. 1). En el grupo B abandonamos, por tanto, la tonometría gástrica y nos centramos en la tonometría intestinal, alargando el período de isquemia a 2 h. Sin embargo, el Tonocap era capaz de medir la PrCO_2 hasta una valor máximo de 105-107 torr, que se alcanzaba generalmente a los 60 min del pinzamiento total de la AMS. Por ello, una vez rebasado este tiempo, los cálculos tonométricos carecían de credibilidad. Finalmente, en el grupo C se redujo el flujo de la AMS al 30% del basal, buscando una cierta similitud con las situaciones de isquemia intestinal por bajo gasto. El pH del ileón presentó un descenso más suave y la PrCO_2 no llegó a 105 torr al final de las 3 h. Las variaciones en la ventilación de los cerdos pueden incidir en los valores de la PCO_2 arterial y, por tanto, en los de la PrCO_2 intestinal, como ya describieron otros investigadores^{8,23}. Teniendo en cuenta esto, la diferencia entre la PCO_2 arterial y la PrCO_2 (GAP) parece un parámetro más exacto que el pH o la PrCO_2 para identificar condiciones de bajo flujo visceral²¹.

Como resumen de este trabajo experimental podemos concluir que: a) la tonometría gástrica requiere más estudios para demostrar su eficacia en el diagnóstico precoz de la isquemia mesentérica frente a los excelentes resultados de la tonometría intestinal; b) el tonómetro por aire refleja de forma rápida y sensible los cambios en el pH intestinal pero sólo es capaz de medir hasta una PrCO_2 de 105-107 torr, y c) el Tonocap puede ser utilizado clínicamente para detectar de forma temprana condiciones de bajo flujo en vísceras huecas.

Bibliografía

1. Antonsson JB, Boyle III CC, Kruithoff KL, Wang H, Sacristán E, Rothschild HR et al. Validation of tonometric measurement of gut intramural pH during endotoxemia and mesenteric occlusion in pigs. *Am J Physiol* 1990; 259: G519-G523.
2. Knichwitz G, Rötker J, Möllhoff T, Richter KD, Brüssel T. Continuous intramucosal PCO_2 measurement allows the early detection of intestinal malperfusion. *Crit Care Med* 1998; 26: 1550-1557.
3. Poole JW, Sammartano RJ, Boley SJ. The use of tonometry in the early diagnosis of mesenteric ischemia. *Curr Surg* 1987; 44: 21-24.
4. Montgomery A, Hartmann M, Jonsson K, Haglund U. Intramucosal pH measurement with tonometers for detecting gastrointestinal ischemia in porcine hemorrhagic shock. *Circ Shock* 1989; 29: 319-327.
5. Fiddian-Green RG, Pittenger G, Whitehouse WM. Back diffusion of CO_2 and its influence on the intramural pH in gastric mucosa. *J Surg Res* 1982; 33: 39-48.
6. Tzlepis G, Kadas V, Michalopoulos A, Geroulanos S. Comparison of gastric air tonometry with standard saline tonometry. *Intensive Care Med* 1996; 22: 1239-1243.
7. Salzman AL, Strong KE, Wang H, Wollert PS, Vandermeer TJ, Finn MP. Intraluminal "balloonless" air tonometry: a new method for determination of gastrointestinal mucosal carbon dioxide tension. *Crit Care Med* 1994; 22: 126-134.
8. Kolkman JJ, Zwaarekant LJ, Boshuizen K, Groeneveld Ab, Meuwissen SG. In vitro evaluation of intragastric PCO_2 measurement by air tonometry. *J Clin Monit* 1997; 13: 15-119.
9. Creteur J, De Backer D, Vincent JL. Monitoring gastric mucosal carbon dioxide pressure using gas tonometry: in vitro and in vivo validation studies. *Anesthesiol* 1997; 87: 504-510.
10. Heinonen PO, Jousela IT, Blomqvist KA, Olkkola KT, Takkunen OS. Validation of air tonometric measurement of gastric regional concentrations of CO_2 in critically ill septic patients. *Intensive Care Med* 1997; 23: 524-529.
11. Temmesfeld-Wolbrück B, Szalay A, Olszewski H, Grimminger F, Seeger W. Advantage of buffered solutions or automated capnometry air-filled balloons for use in gastric tonometry. *Intensive Care Med* 1997; 23: 423-427.
12. Taylor DE, Gutiérrez G, Clark C, Hainley S. Measurement of gastric mucosal carbon dioxide tension by saline and air tonometry. *J Crit Care* 1997; 12: 208-213.
13. Janssens U, Graf J, Koch KC, Hanrath P. Gastric tonometry: in vivo comparison of saline and air tonometry in patients with cardiogenic shock. *Br J Anaesth* 1998; 81: 676-680.
14. Venkatesh B, Morgan J, Jones RD, Clague A. Validation of air as equilibration medium in gastric tonometry: an in vivo evaluation of two techniques for measuring PCO_2 . *Anaesth Intensive Care* 1998; 26: 46-50.
15. Barry B, Mallick A, Hartley G, Bodenham A, Vučević M. Comparison of air tonometry with gastric tonometry using saline and other equilibrating fluids: an in vivo and in vitro study. *Intensive Care Med* 1998; 24: 777-784.
16. Gutiérrez G, Palizas F, Doglio G, Wainsztein N, Gallesio A, Pacini J et al. Gastric intramucosal pH as a therapeutic index of tissue oxygenation in critically ill patients. *Lancet* 1992; 339: 195-199.
17. Bennett-Guerrero E, Panah MH, Bodian CA, Methikalam BJ, Alfaro-Neira JR, De Perio M et al. Automated detection of gastric luminal partial pressure of carbon dioxide during cardiovascular surgery using the Tonocap. *Anesthesiol* 2000; 92: 38-45.
18. Lebuffe G, Decoene C, Pol A, Prat A, Vallet B. Regional capnometry with air-automated tonometry detects circulatory failure earlier than conventional hemodynamics after cardiac surgery. *Anesth Analg* 1999; 89: 1084-1090.
19. Soong CV, Halliday MI, Hood JM, Rowlands BJ, Barros-D'Sa AA. The use of tonometry to predict mortality in patients undergoing abdominal aortic aneurysm repair. *Eur J Vasc Endovasc Surg* 1998; 15: 24-28.
20. Bergofsky EH. Determinations of tissue O_2 tensions by hollow visceral tonometers: effect of breathing enriched O_2 mixtures. *J Clin Invest* 1964; 43: 193-200.
21. Ruettimann U, Urwyler A, Von Flue M, Reinhardt D, Pargger H. Gastric intramucosal pH as a monitor of gut perfusion after thrombosis of the superior mesenteric vein. *Acta Anaesthesiol Scand* 1999; 43: 780-783.
22. Campbell ME, Van Aerde JE, Cheung PY, Mayes DC. Tonometry to estimate intestinal perfusion in newborn piglets. *Arch Dis Child Fetal Neonatal Ed* 1999; 81: F105-109.
23. Knichwitz G, Rotker J, Brüssel T, Kuhmann M, Mertes N, Möllhoff D. A new method for continuous intramucosal PCO_2 measurement