

ARTÍCULO DIDÁCTICO PROBLEMA BIOQUÍMICO Equilibrio ácido-base

PROBLEMA BIOQUÍMICO EQUILIBRIO ÁCIDO-BASE

Rebeca Milán-Chávez* (1), Sara Morales-López (1), Lilia Morales-García (1),
Rocío Álvarez Medina (1), Teresa Fortoul Van Der Goes (2)

(1) Departamento de Bioquímica, Facultad de Medicina, UNAM, CDMX, (2) Departamento de
Biología Celular y Tisular Facultad de Medicina, UNAM, CDMX, México

*Autor de correspondencia correo E: milan@bq.unam.mx

RESUMEN

Los pacientes que llegan a la sala de urgencias con desequilibrios ácido-base son aproximadamente el 80% de los casos. Por esta razón es importante que el médico reconozca estas alteraciones y su corrección. Además del interrogatorio y la semiología el médico debe saber interpretar los valores de la gasometría arterial (pH, bicarbonato y presión parcial de CO₂), así como la relación que estos valores tienen entre ellos en la ecuación de Henderson-Hasselbalch. De igual manera no debe olvidar los mecanismos compensatorios que se activan para que el paciente llegue a la homeostasis.

PALABRAS CLAVE

desequilibrio
ácido-base,
pH,
Henderson-
Hasselbalch,
gasometría,
compensación

ABSTRACT

It has been determined that around 80% of patients arriving to the emergency rooms present acid-base imbalances. Consequently, it is crucial for physicians to recognize these disorders and be familiar with the correction methods available. Besides getting a clinical history and carrying out a physical examination, physicians must be able to interpret arterial blood gas values (pH, bicarbonate and partial pressure of CO₂), as well as understand the relationship between these values in the Henderson-Hasselbalch equation. It is also crucial to know the compensatory mechanisms that are initiated to help the patient achieve homeostasis.

KEYWORDS

acid-base
imbalance,
pH,
Henderson-
Hasselbalch,
blood gas,
compensation

Introducción

Entre los temas que revisan los estudiantes de la licenciatura de Médico Cirujano se encuentra el equilibrio ácido-base, así como los principales padecimientos que lo alteran; se ha observado que a los estudiantes les resulta complicado comprender el tema. Para lograr una mejor comprensión del tema, primero se debe entender qué es el pH. Éste, por definición, es el potencial de hidrógeno (pH) en solución y depende de la concentración de hidrogeniones (H^+) y se calcula mediante la ecuación 1:

$$\text{(Ecuación 1)} \quad \text{pH} = -\log [H^+]$$

Otro concepto necesario de recordar es la definición de ácido que es aquella sustancia que tiende a donar un protón en una solución acuosa como se describe en la reacción 1. La disociación de una sustancia ácida suele ser reversible por lo que presenta una constante de equilibrio entre las concentraciones de productos y reactivos; esto se expresa en la ecuación 2 con base en la ley de acción de masas:



$$\text{(Ecuación 2)} \quad K_a = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]}$$

Cuando se trata de ácidos fuertes, estos se disocian completamente, por lo cual solamente encontramos de manera predominante a los protones y, por lo tanto, para calcular el valor del pH en la solución se emplea la ecuación 1. En cambio, si se trata de un ácido débil disuelto en solución, este no se encuentra completamente disociado y siempre tendremos presentes tanto al ácido como a la base, y por lo tanto, para llevar a cabo el cálculo del pH se debe emplear la ecuación 3, conocida como la ecuación de Henderson-Hasselbalch:

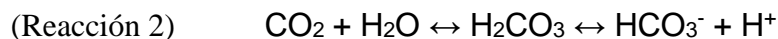
$$\text{(Ecuación 3)} \quad \text{pH} = \text{pKa} + \log \frac{[\text{base}]}{[\text{ácido}]}$$

La determinación del pH en el humano se realiza en sangre arterial, primordialmente en el plasma, los valores normales se encuentran entre 7.35 y 7.45. Por lo que a menor pH se tiene mayor concentración de H^+ , mientras que un pH elevado presenta menor concentración de H^+ . Por consiguiente, cuando el pH es menor se reporta una acidosis y cuando es mayor una alcalosis, siendo ambas condiciones patológicas.

Como parte del metabolismo celular, a partir de los macronutrientes, se generan diferentes tipos de compuestos; algunos funcionan como sustratos en otras vías metabólicas, o bien como parte del metabolismo oxidativo para obtener energía. También se genera CO_2 , el cual se considera un producto de desecho que al reaccionar con agua se transforma en ácido carbónico que es un ácido débil, y que se disocia en bicarbonato y un protón.

Mantener el pH sanguíneo dentro de los parámetros de normalidad es vital para el organismo, y dadas las condiciones rápidamente cambiantes por demandas de la actividad metabólica, se cuenta con sistemas amortiguadores. El más importante está constituido por el par bicarbonato/ácido carbónico (HCO_3^-/H_2CO_3); en el eritrocito por acción de la anhidrasa carbónica se transforma reversiblemente el CO_2 y H_2O en H_2CO_3 , que al ser un ácido débil se disocia en ion bicarbonato (HCO_3^-) y en protones (H^+). Es importante mencionar que en muchos textos encontramos que el par está conformado por $[HCO_3^-/CO_2]$ según la reacción 2 y la

ecuación 3 que la representa; pero debido a que el ácido carbónico es un ácido débil, éste se descompone rápidamente en CO_2 por lo tanto la ecuación 4 representa la forma en la que se encuentra en el organismo.



$$\text{(Ecuación 3)} \quad \text{pH} = \text{pKa} + \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{H}_2\text{CO}_3]}$$

$$\text{(Ecuación 4)} \quad \text{pH} = \text{pKa} + \frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]}$$

Debido a que el CO_2 es un gas, su concentración se encuentra dada en milímetros de mercurio (mmHg) y para emplear la ecuación es necesario convertir el valor en milimolar. Para hacerlo, se debe multiplicar por el coeficiente de solubilidad del gas que es 0.0308 y de esta forma el valor queda convertido en milimolar (mM).

Aunque este par amortiguador no es el único que hace frente a los cambios en el pH de la sangre, si es abundante además de eficiente y el sistema respiratorio lo regula con cambios en la frecuencia respiratoria y del volumen ventilatorio. Por ejemplo, un aumento en la concentración de CO_2 ocasiona una disminución del pH, lo que estimula al centro hipotalámico de la respiración para aumentar la ventilación, que reducirá

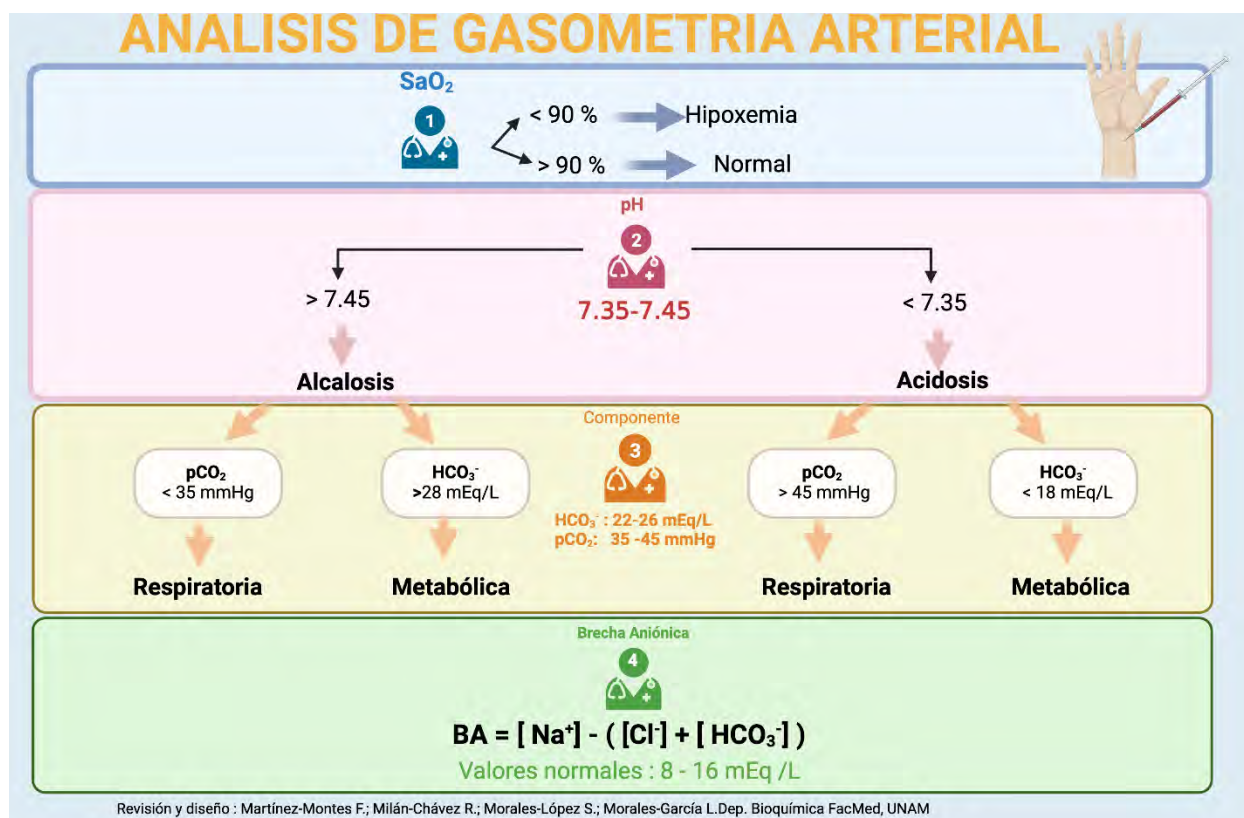


Figura 1. Pasos para realizar el análisis de una gasometría. Considera los parámetros esenciales con sus valores normales, así como sus posibles desviaciones, al relacionar el incremento o decremento de bicarbonato y CO_2 para definir el tipo de alcalosis o acidosis. El dato de la Brecha Aniónica (BA) permitirá diferenciar alteraciones en electrolitos sumado al tipo de desequilibrio ácido-base

la concentración de CO_2 y por lo tanto de H_2CO_3 para compensar el cambio de pH. Adicionalmente, si la disminución del pH persiste, el riñón regula la concentración de bicarbonato aumentando su reabsorción e incrementando la excreción de H^+ .

La concentración de CO_2 puede incrementarse debido a un aumento en su producción como parte del metabolismo oxidativo de la célula para obtener energía a partir de los macronutrientes, o bien por una disminución en la eliminación pulmonar, lo que generará una disminución del pH sanguíneo y por lo tanto una acidosis. En contraste, una mayor actividad respiratoria puede aumentar la eliminación de CO_2 y causar alcalosis respiratoria. Dado el intercambio respiratorio, (ingreso de O_2 y salida de CO_2), la acidosis respiratoria se acompaña de hipoxemia, que es la reducción de la concentración de oxígeno en la sangre (2), por lo que para llevar a cabo el diagnóstico es importante tomar en cuenta la concentración de oxígeno.

Entre los padecimientos más frecuentes que un médico intensivista o urgenciólogo encuentra en su práctica diaria están los desequilibrios ácido-base. Para definir su presencia y magnitud se cuenta con diversos estudios de laboratorio como la gasometría de sangre arterial, la cual entre los datos que aporta están: el pH, las concentraciones expresadas en forma de presiones parciales de bióxido de carbono (pCO_2) y oxígeno (pO_2), así como la concentración de HCO_3^- y de electrolitos como K^+ , Ca^{2+} , Na^+ y Cl^- . Para interpretar los valores de la gasometría se deben seguir los pasos que se muestran en la figura 1 y se describen a continuación:

1. La saturación de oxígeno (SaO_2) nos indica, en forma de porcentaje, la cantidad de oxígeno que se encuentra unido a la hemoglobina. En la sangre arterial normalmente es de 95-100%, cuando los valores están entre 90-94% se consideran bajos pero tolerables. Un valor menor de 90% indica una hipoxemia que puede llegar a ser severa cuando la SaO_2 es $<75\%$. (2)
2. El valor fisiológico del pH es de 7.35 a 7.45, por debajo de 7.35 se considera acidosis, ocasionada por un incremento de la concentración de protones; por el contrario, se considera alcalosis cuando el valor de pH está por arriba de 7.45 debido a una menor concentración de protones.
3. El valor normal de pCO_2 se encuentra entre 35 a 45 mmHg, si éste se encuentra arriba de 45 se asocia con acidosis y puede deberse a un problema respiratorio, mientras que un valor por debajo de 35 puede indicar una alcalosis respiratoria y promover una compensación de una acidosis metabólica.
4. El valor fisiológico del HCO_3^- varía entre 22 a 26 mM o mEq/L, si el valor determinado se encuentra por arriba o debajo de este valor se considera que el padecimiento es de origen metabólico.
5. Los valores arteriales de la presión parcial de oxígeno (pO_2) en condiciones fisiológicas es de 80 a 100 mmHg. Los valores en la concentración de O_2 pueden variar por diferentes causas, tales como la altitud, hipoventilación, falla respiratoria o bien por una obstrucción pulmonar crónica, entre otras.
6. La concentración de los electrolitos en sangre es de Na^+ 135 a 145 mM, K^+ 3.5 a 5 mM, Cl^- 95 a 105 mM (3). Es importante considerar los valores de los electrolitos ya que, en los procesos de recaptura de bicarbonato (HCO_3^-) por vía renal, interviene el movimiento de estos electrolitos, ver la figura 2, donde se muestra que el proceso de filtración se lleva a cabo de manera diferenciada en las diferentes porciones de la nefrona. En la primera porción conocida como el túbulo proximal se lleva a cabo el 65% del proceso de filtración y secreción; en esta porción se reabsorbe la glucosa y los aminoácidos, así como el lactato y las vitaminas que son solubles en agua. También se reabsorbe entre el 65-80% de los electrolitos Na^+ , K^+ y Cl^- así como HCO_3^- y la mayor cantidad del agua. En la porción denominada como asa de Henle se absorbe Na^+ y K^+ además de una pequeña cantidad de agua. El túbulo contorneado distal, que es impermeable al agua, es en donde se reabsorbe Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} y Ca^{2+} ; estos últimos requieren de un gasto energético para que ocurra; en esta porción de la nefrona también se reabsorbe HCO_3^- .

Durante la interpretación de los datos de la gasometría se debe considerar que si los valores de pCO_2 y HCO_3^- se mueven hacia la misma dirección el desequilibrio se considera simple, mientras que si lo hacen en sentidos opuestos el desequilibrio es mixto. Tanto en los padecimientos simples como en los mixtos, el organismo lleva a cabo una compensación que corresponde con el desequilibrio.

DESÓRDENES ÁCIDO-BASE

Acidosis respiratoria. Se presenta cuando aumenta la concentración de CO_2 en el organismo; esto puede deberse a un daño en el centro respiratorio, o bien por una sedación en un proceso postoperatorio, estado de coma, así como por el abuso de narcóticos, falla cardíaca o enfermedad pulmonar. La compensación será primero, aumentar la frecuencia respiratoria para tratar de eliminar el exceso de CO_2 . Si esto no es suficiente entonces el riñón empezará a recapturar mayor cantidad HCO_3^- para aumentar la concentración de base en sangre y al mismo tiempo se eliminará una mayor cantidad de H^+ por orina.

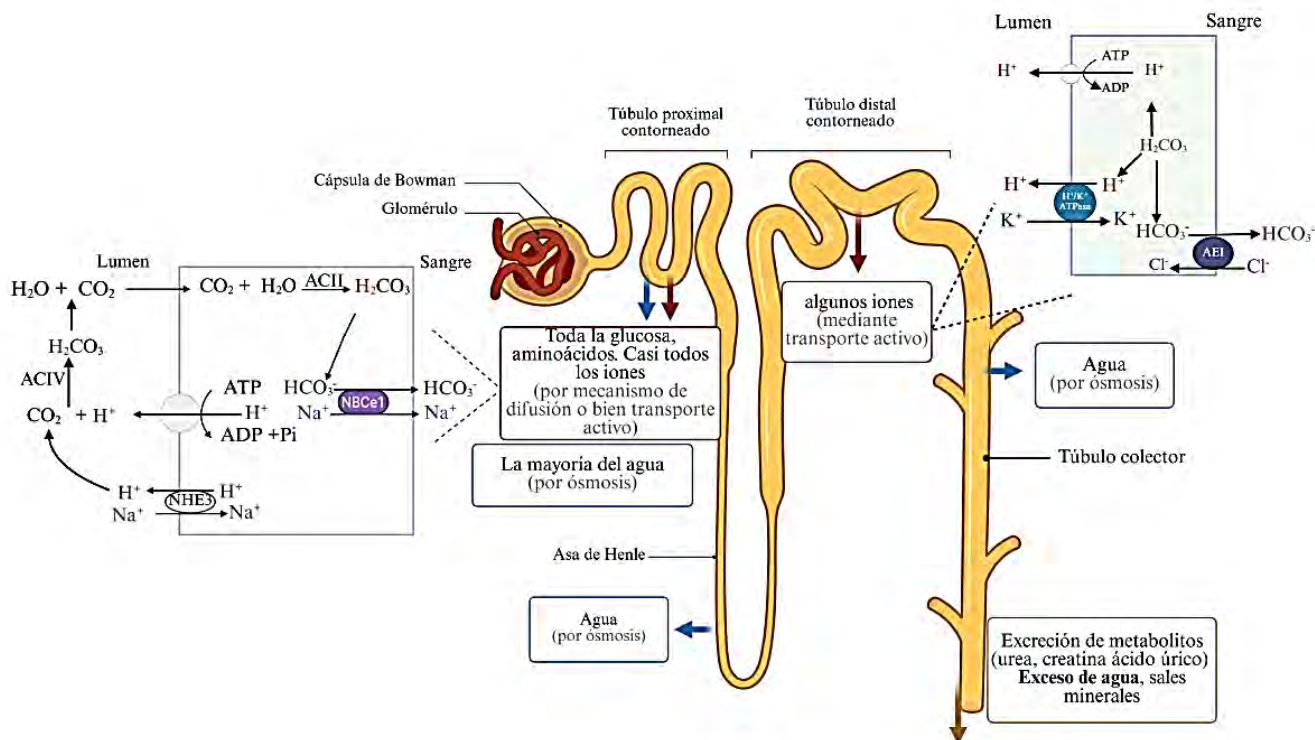


Figura 2. Mecanismo de filtración y absorción renal de electrolitos y bicarbonato. NHE3, ATPasa Na^+/H^+ . NHE3 intercambiador de Sodio-Hidrógeno 3. NBCe1 es un cotransportador basolateral. AE1 intercambiador $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$. Anhidrasa carbónica CAIV y CAII (modificada de *acid-base disorders in the critically ill patient* (4)).

Alcalosis Respiratoria. Este padecimiento se caracteriza por una disminución de la concentración de CO_2 en el organismo debido a un aumento en la frecuencia respiratoria como en una crisis nerviosa o un aumento de la temperatura corporal. El mecanismo de compensación será disminuir la frecuencia respiratoria aumentando la concentración de CO_2 que dará origen a un aumento en la concentración de H_2CO_3 en el organismo, lo que conlleva una disminución en el pH. En este tipo de padecimiento, el riñón evita la pérdida de H^+ por orina.

Acidosis metabólica. Se presenta por un incremento en la concentración de H^+ en la sangre, que puede ser originado por un aumento en la producción de ácido láctico y/o cuerpos cetónicos, diarrea intensa por períodos prolongados –por lo menos tres días–, intoxicación con metanol, actividad muscular intensa, así como en padecimientos asociados con una falla renal, donde se disminuye la excreción de protones. El mecanismo de compensación se lleva a cabo a nivel pulmonar con un incremento en la frecuencia respiratoria lo cual favorece una mayor excreción de CO_2 y con ello la disminución de H_2CO_3 .

Alcalosis metabólica. Se puede originar por un aumento en la cantidad de HCO_3^- que puede deberse a: vómito frecuente, aparición de una fístula gástrica, consumo de diuréticos, aspiración por sonda nasogástrica, hiperventilación en enfermedades neuropsiquiátricas, entre otros. El mecanismo de com-

pensación de este padecimiento es la disminución de la frecuencia respiratoria para aumentar la concentración de H_2CO_3 en el organismo, mientras que el riñón disminuye la excreción de H^+ . Mediante estos procesos se aumenta la concentración de ácido en el organismo, lo que ayuda a disminuir la concentración de HCO_3^- .

En el caso de los padecimientos mixtos por ejemplo, una falla pulmonar que da una acidosis respiratoria y un mal control de la diabetes que conduce a una mayor producción de cuerpos cetónicos y genera una acidosis de tipo metabólico (cetoacidosis), el primer mecanismo de compensación será respiratorio, pero después existirá una compensación renal.

La Brecha Aniónica. Otro concepto importante para considerar en los padecimientos con desequilibrio ácido-base, es la brecha aniónica (BA) cuyo valor fisiológico es de 8 -16 mEq/L. Este parámetro toma en cuenta la diferencia entre los principales cationes plasmáticos, especialmente la concentración de Na^+ . Asimismo, también se puede incorporar al K^+ , pero debido a que cambios significativos en la concentración de este catión son incompatibles con la vida, no se emplea de manera frecuente en el cálculo. Los aniones plasmáticos tomados en cuenta son el Cl^- y el HCO_3^- (5). La brecha aniónica se emplea para determinar si existe un desequilibrio tanto en el metabolismo de electrolitos, como en trastornos del equilibrio ácido-base, principalmente aquellos asociados con la disminución en la concentración de bicarbonato, como es el caso de la acidosis metabólica; esto ocasiona que la brecha aniónica se encuentre disminuida, pero en el caso de que el paciente presente una acidosis metabólica con brecha aniónica normal, se puede deber a que exista una hipercloremia que trata de compensar la pérdida de bicarbonato; de ahí la importancia de la determinación de los electrolitos plasmáticos principales (figura 3).

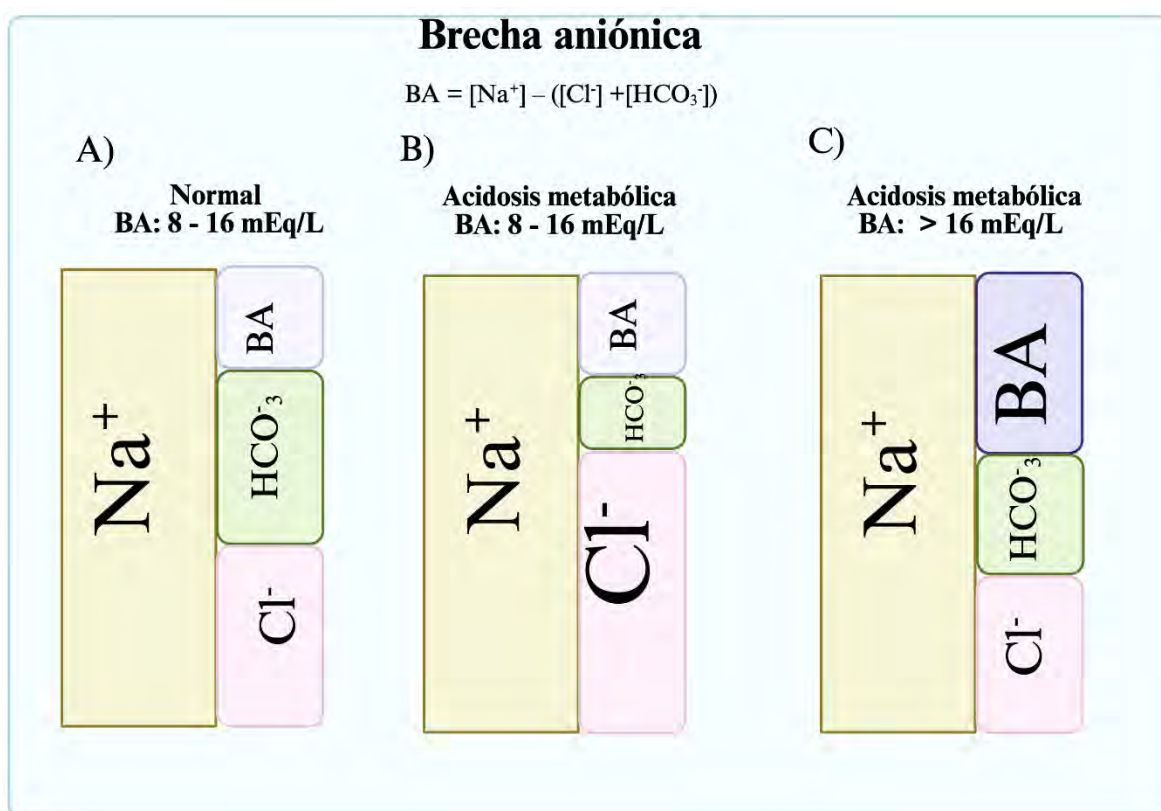


Figura 3. Representación de brecha aniónica. **A)** Brecha aniónica en rangos normales y concentración de iones en homeostasis; **B)** Representa una acidosis metabólica con una brecha aniónica dentro de parámetros normales con un incremento en la concentración de cloro y disminución en bicarbonato; **C)** Acidosis metabólica con un incremento en la brecha aniónica a expensas de las concentraciones del bicarbonato y cloro.

Problemas

Se presentan los datos de dos gasometrías con los cuales podemos repasar cómo se lleva a cabo su lectura, así como interpretar el tipo de desequilibrio ácido-base. Posteriormente, tenemos dos problemas en donde no solamente se tienen los datos de la gasometría, sino que también se cuenta con el historial clínico del paciente, lo que aporta más información acerca del padecimiento que dio origen al desequilibrio ácido-base.

Problema 1 datos de la gasometría:

pH = 7.25	Na ⁺ = 141.20 mEq/L	pCO ₂ = 51.62 mmHg	Cl ⁻ = 94.3 mEq/L
paO ₂ = 90 mmHg	SO ₂ = 96%	HCO ₃ ⁻ = 22 mM	

Pregunta: ¿Cuál es el desequilibrio ácido-base que presenta el paciente?

Problema 2 datos de la gasometría:

pH = 7.3 (7.35 - 7.45)	pCO ₂ = 62.2 mmHg (35 – 45 mmHg)
pO ₂ = 69.2 mmHg (75 - 100 mmHg)	HCO ₃ ⁻ = 31.5 mEq/L (22 - 26 mEq/L)
Na ⁺ = 141.2 mEq/L (135 – 148 mEq/L)	K ⁺ = 4.4 mEq/L (3.6 – 5.2 mEq/L)
Cl ⁻ = 94.3 mEq/L (96 – 106) mEq/L	Lactato = 1.11 mM (1 – 1.5 mM)

Pregunta: ¿Cuál es el desequilibrio ácido-base que presenta el paciente?

Problema 3

Mujer de 82 años ingresada al servicio de urgencias, después de haber sufrido una caída de su propio plano de sustentación. Con base en la exploración física y tomografía cerebral se encontró hemorragia subaracnoidea en la región occipital derecha. Como antecedentes personales patológicos (APP) se refiere hipertensión y fibrilación atrial. Los familiares comentan que ha tenido varias caídas en los últimos 6 meses e inició con pérdida de memoria. Tiene 7 en escala de Glasgow, en región cardíaca no se ausculta soplos ni arritmias, campos pulmonares limpios sin sibilancias ni estertores, frecuencia respiratoria de 24 rpm (respiraciones por minuto).

Se le realizan los siguientes estudios de laboratorios: electrolitos séricos: Sodio 142 mEq/L, Potasio 3.9 mEq/L, Cloro 118 mEq/L, gasometría arterial: pH 7.47, pCO₂: 23 mmHg y bicarbonato de 23 mEq/L.

Pregunta: ¿Cuál es el desequilibrio ácido-base que presenta la paciente?

Problema 4

Paciente de 68 años ingresa al servicio de urgencias tras el diagnóstico de COVID-19 por prueba rápida, con saturación de oxígeno de 88%, llenado capilar de 4 segundos, acude con oxígeno administrado por puntas nasales a un flujo de 3 L/min; sin embargo, no mejora la disnea ni la saturación de oxígeno.

Se realiza gasometría con los siguientes resultados:

•pH: 7.4	Electrolitos séricos:	
•pCO ₂ : 47.5 mmHg	•Sodio: 142 mEq/L	•Cloro: 103 mEq/L
•Bicarbonato: 27.1 mEq/L	•Potasio: 3.7 mEq/L	•Calcio: 2.4 mEq/L

Pregunta: ¿Cuál es el desequilibrio ácido-base que presenta el paciente?