

Líquidos y electrolitos

Elsi Olaya Estefan

Segunda edición





Elsi Olaya Estefan

Médica y Cirujana, Magíster en Ciencias básicas biomédicas de la Universidad de Antioquia.

Actualmente es profesora titular y coordinadora de Fisiología de la Facultad de Medicina de la Universidad Pontificia Bolivariana. Apoyó y participó en la docencia de los programas de Biofísica y Semiólogía de la UPB y fue profesora de cátedra del programa de posgrado de Ingeniería Biomédica de la misma Universidad.

Ocupó los cargos de Jefe del Departamento de Fisiología, Vicedecana y Decana encargada de la Facultad de Medicina de la Universidad de Antioquia. Coordinó el programa de posgrado de Medicina Deportiva de la misma Universidad.

Fue jefe del Departamento de Ciencias Básicas Biomédicas y docente titular desde la iniciación de la facultad de Medicina de la Fundación San Martín, sede Sabaneta.

Elsi Olaya Estefan

Líquidos y electrolitos

Segunda edición

QU105
O4-19

Olaya Estefan, Elsi, autor
Líquidos y electrolitos / Elsi Olaya Estefan – 2da ed. - Medellín: UPB,
2019.
166 p.; 17 x 24 cm. –
ISBN: 978-958-764-714-3

1. Agua – 2. Líquidos Corporales – 3. Electrólitos – 4. Sed –
5. Compartimentos de Líquidos Corporales – I. Título

CO-MdUPB / spa / rda
NML

© Elsi Olaya Estefan
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana
Vigilada Mineducación

Líquidos y electrolitos
ISBN: 978-958-764-714-3
Segunda edición, 2019

Líquidos y electrolitos (digitalizado, 2023)
ISBN: 978-628-500-096-6 (versión digital)
Escuela Ciencias de la Salud

Gran Canciller UPB y Arzobispo de Medellín: Mons. Ricardo Tobón Restrepo
Rector General: Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda
Vicerrector Académico: Álvaro Gómez Fernández
Decano de la Escuela de Ciencias de la Salud: Marco Antonio González Agudelo
Editor: Juan Carlos Rodas Montoya
Coordinación de Producción: Ana Milena Gómez Correa
Corrección de Estilo: Fernando Aquiles Arango
Diagramación: María Isabel Arango Franco

Dirección Editorial
Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2019
Correo electrónico: editorial@upb.edu.co
www.upb.edu.co
Medellín - Colombia

Radicado: 1843-03-04-19

Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

Tabla de contenido

Introducción	9
Capítulo 1	11
El agua: principio de vida	11
Objetivos.....	11
1. El agua: principio de vida	12
1.1 Estructura y propiedades del agua	12
1.1.1 Acción disolvente	14
1.1.2 Fuerza de cohesión elevada	15
1.1.3 Calor específico alto	15
1.1.4 Alta conductividad térmica.....	16
1.1.5 Elevado calor de vaporización	16
1.1.6 Tensión superficial.....	16
1.1.7 Densidad del agua.....	18
1.1.8 Viscosidad dinámica del agua	18
¿Qué es una solución?.....	19
1.2 Difusión.....	20
1.2.1 Difusión a través de membranas	20
1.3 Clasificación de las membranas	22
1.3.1 Membranas impermeables.....	22
1.3.2 Membranas permeables	22
1.3.3 Membranas semipermeables	22

1.4	Ósmosis	23
1.4.1	Presión osmótica	25
1.4.2	Tonicidad de los líquidos corporales	28
Capítulo 2	.....	35
Distribución del agua - compartimientos hídricos	.....	35
Objetivos	.....	35
2. Distribución del agua - compartimientos hídricos	.....	36
2.1	Distribución del agua corporal total: compartimientos hídricos	40
	¿Qué es un compartimiento?	40
2.1.1	Líquido intracelular (LIC)	42
2.1.2	Líquido extracelular (LEC)	43
2.1.3	Líquidos transcelulares	46
2.2	Composición de los compartimientos	48
2.3	Compartimientos hídricos en el recién nacido y en el niño	49
2.4	Métodos para calcular el contenido de ACT y los compartimientos hídricos.....	53
Capítulo 3	.....	59
Balance hídrico y manejo de agua	.....	59
Objetivos	.....	59
3. Balance hídrico y manejo de agua	.....	60
3.1	Ingresos o ganancias de agua	60
3.2	Egresos o pérdidas de agua	61
3.3	Balance	74
Capítulo 4	.....	85
Electrolitos corporales - iones	.....	85
Objetivos	.....	85
4. Electrolitos corporales - iones	.....	86
4.1	Peso atómico, peso molecular, mol, milimol.....	86
4.2	Equivalencia electroquímica - equivalente - miliequivalente - neutralidad eléctrica	88
4.2.1	Principio de la neutralidad eléctrica	92
4.3	Presión osmótica - osmoles - miliosmoles - osmolaridad.....	94
	Diferencia entre osmolalidad y osmolaridad.....	99
4.4	Principales iones de los compartimientos	100
4.4.1	Sodio.....	100

Capítulo 5.....	117
Movimiento de agua y electrolitos entre los compartimientos	117
Objetivos	117
5. Movimiento de agua y electrolitos entre los compartimientos	118
5.1 Movimiento de los solutos	118
5.1.1 Mecanismos pasivos	119
5.1.2 Mecanismos activos.....	119
5.2 Movimiento del solvente	122
5.2.1 Ósmosis o desplazamiento osmótico.....	122
5.2.2 Filtración.....	123
5.2.3 La linfa.....	127
Capítulo 6.....	135
Regulación hidroelectrolítica - mecanismos de control	135
Objetivos	135
6. Regulación hidroelectrolítica - mecanismos de control.....	136
6.1 Sensores de osmolaridad - osmorreceptores	137
6.1.1 Mecanismos de la sed	139
6.1.2 Hormona antidiurética.....	139
6.2 Regulación de la presión sanguínea por medio de los barorreceptores.....	142
6.3 Sensores de baja presión o de volumen	145
6.3.1 Péptido o factor natriurético atrial (FNA).....	145
6.4 Participación renal en el homeostasis hidro-electrolítica	147
6.4.1 Sistema renina-angiotensina-aldosterona	147
Aplicaciones	155
Caso No. 1	155
Caso No. 2.....	156
Preguntas para el caso de Arnoldo	157
Preguntas de opción múltiple	160
Bibliografía.....	163



Introducción

La acogida que tuvo la primera edición del texto “Líquidos y electrolitos” por parte de mis estudiantes, me ha propiciado la revisión y actualización de los contenidos con el propósito de mejorar y ampliar la comprensión de un tema que, con frecuencia, resulta difícil de abordar y proyectar hacia las ciencias médicas.

Este texto está dirigido a estudiantes de los primeros semestres de las ramas de Ciencias de la Salud y pretende aportar las bases iniciales para la comprensión posterior del manejo de los líquidos en cualquier tipo de paciente que lo requiera.

Con mucho gusto presento esta segunda edición y espero, por parte de ustedes, todo tipo de comentario, sugerencia y crítica, como proceso de retroalimentación para mejorar cada día más.

Recuerde que este texto no pretende cubrir completamente el contenido de un tema tan extenso como este. Mi recomendación es complementar con la bibliografía que se dispone dentro de la literatura mundial.



Capítulo 1

El agua: principio de vida



Objetivos

Al finalizar el capítulo 1, el estudiante estará en capacidad de:

1. Reconocer la estructura química del agua, las propiedades derivadas de dicha estructura y su relación con los procesos en los organismos vivos.
2. Exponer las principales propiedades físico-químicas del agua y su importancia en el mantenimiento de la vida.
3. Señalar la importancia del agua como componente de los seres vivos y su función como el principal solvente en las soluciones y en los líquidos orgánicos.
4. Explicar el comportamiento de las soluciones electrolíticas y su impacto sobre las células.
5. Definir y diferenciar los procesos de difusión y de ósmosis considerando los diversos tipos de membranas que pueden separar dos o más soluciones acuosas y aplicarlos al cuerpo humano.
6. Explicar y mostrar con un ejemplo la importancia de la Ley de Fick en los procesos fisiológicos.
7. Describir el significado funcional del término “presión osmótica” y su importancia en el movimiento de los líquidos entre los compartimientos.
8. Diferenciar con ejemplos los términos tonicidad y osmolaridad.

1. El agua: principio de vida

Las teorías sobre el origen de la vida apoyan la hipótesis de su aparición como el resultado de procesos físicos y químicos en una secuencia gradual que solo pudo ocurrir en un medio acuoso como fue el mar hace millones de años. Se cree que empezó en condiciones anaeróbicas propiciada por las propiedades del agua que lo componen. El volumen del mar es tan enorme que puede absorber o perder grandes cantidades de calor con escasas variaciones de la temperatura y los cambios significativos de su composición sólo tienen lugar durante un período de centenares de millares de años ^{1,2}.

A lo largo del proceso evolutivo, la composición del agua que rodea las células de los vertebrados incluyendo al hombre, ha sufrido modificaciones; sin embargo, posee semejanzas con las que tenía el mar en épocas más remotas. Con el transcurso de los tiempos, los ríos han erosionado las tierras y han vertido sus elementos en el mar, pero aun así se pueden descubrir características que semejan al mar con los líquidos que rodean las células vivas. Ejemplo de ello es la composición iónica del mar, que muestra al igual que el líquido extracelular de los animales multicelulares, una solución cuyos solutos más abundantes son el sodio y el cloro. Otros componentes en menor proporción se encuentran tanto en el plasma y en el intersticio de los tejidos, como en el mar: calcio, magnesio, sulfato, bicarbonato, etc.

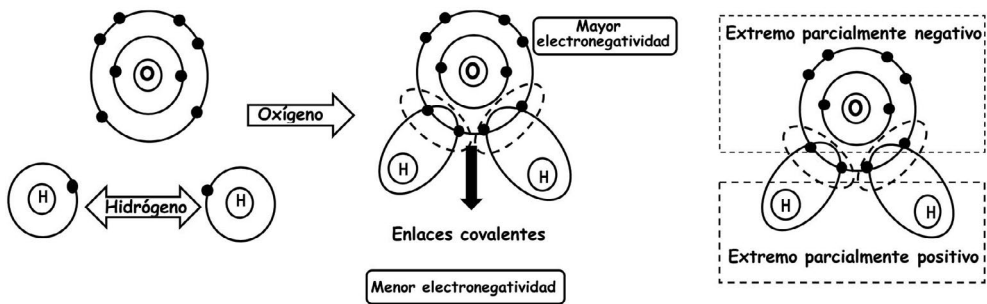
1.1 Estructura y propiedades del agua

Las propiedades del agua son la base físico-química de una serie de funciones esenciales para la integridad del organismo y dependen en gran parte de la estructura de la molécula y de la ordenación de las moléculas en la fase líquida^{3,4}. El agua es el **disolvente general** por excelencia en los seres vivos y condiciona muchos fenómenos: ósmosis, mantenimiento del estado coloidal del protoplasma, transporte de los compuestos nutritivos y productos de desecho de la actividad celular, etc.

La molécula agua es un tetraedro eléctricamente neutro (igual número de cargas positivas que negativas) que está formada por dos átomos de hidrógeno (H) unidos a un átomo de oxígeno (O) por *dos uniones covalentes* (Figura 1.1). Entre los enlaces H-O-H se forma un ángulo de 104.5° que es un poco menor que el del tetraedro (109.5°) lo que hace que

se convierta en una molécula asimétrica. Como el oxígeno es más electronegativo que el hidrógeno, la distribución de los electrones en el interior de la molécula le confiere asimetría eléctrica que la transforma en una **molécula polarizada** de manera que el polo donde está el hidrógeno se comporta como polo positivo, mientras que el oxígeno se comporta como polo negativo. El término “**dipolo**” hace referencia a moléculas que tienen carga eléctrica (electrones) distribuida alrededor de su estructura, en forma desigual.

Figura 1.1. Formación de una molécula de agua.

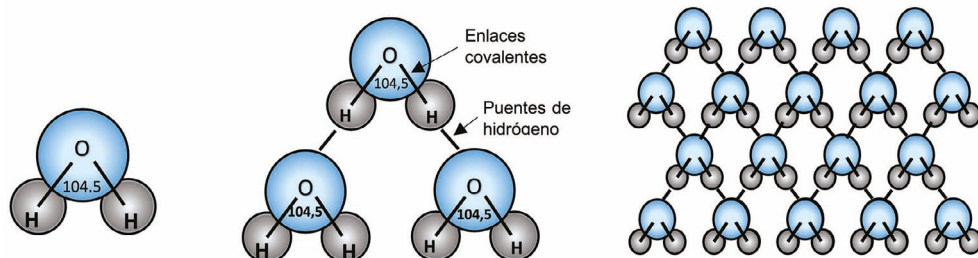


El oxígeno tiene otros dos sitios de unión además de los que utiliza para unirse con el hidrógeno. O sea que utiliza dos sitios de unión como parte de los enlaces covalentes para el hidrógeno y dos sitios no compartidos en el lado opuesto.

La interacción electrostática entre el núcleo de hidrógeno de una molécula de agua y el par de electrones no compartidos de otra molécula, se denomina “**punto de hidrógeno**”. Los puentes de hidrógeno son uniones muy débiles que se rompen fácilmente si se comparan con los enlaces covalentes; para romper un enlace de hidrógeno se requiere del 1 al 4% de la energía que se requiere para romper el enlace covalente O-H del agua.

La unión entre una molécula de agua y sus vecinas se debe a los puentes de hidrógeno generados por la interacción dipolo-dipolo dada por la carga parcial negativa del oxígeno de una molécula y la carga parcial positiva del hidrógeno de otra molécula adyacente. Alrededor de cada molécula de agua se disponen otras cuatro moléculas unidas por puentes de hidrógeno formando una estructura de tipo reticular que le otorga un comportamiento particular y las propiedades físico-químicas especiales (Figura 1.2).

Figura 1.2. Estructura de la molécula de agua.



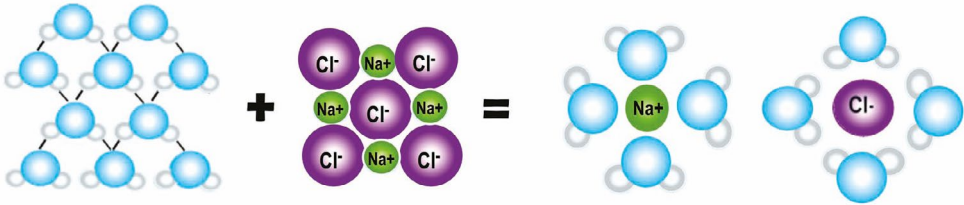
El “agua pura” tiene propiedades muy definidas⁵: congela a 0°C a nivel del mar, entra en ebullición a 100°C, y su presión de vapor a 37°C es de 47 mm Hg. Cuando se agrega un soluto, se producen cambios en estas propiedades: congela a menos de 0°C (descenso crioscópico), hierve a más de 100°C (ascenso ebulloscópico), muestra una presión de vapor menor (descenso de la tensión de vapor) y aparece la “presión osmótica”. Todos los cambios ocurren al mismo tiempo por lo cual reciben el nombre de “propiedades coligativas” de las soluciones⁶ y dependen del número de partículas del soluto que están disueltas por unidad de volumen y no del tamaño y del peso de las mismas.

Las propiedades físico-químicas más importantes del agua son⁷:

1.1.1 Acción disolvente

El agua es el líquido que más sustancias disuelve (solvente universal) y esta propiedad es la más importante para la vida porque favorece las reacciones metabólicas. La interacción dipolo-dipolo que permite la formación de enlaces por puentes de hidrógeno con otras sustancias propicia la disolución de compuestos iónicos como las sales minerales y los compuestos covalentes polares. La solubilidad depende de las propiedades de un solvente que le permitan interactuar con un soluto de manera más fuerte que como lo hacen las partículas del solvente unas con otras. Las moléculas de agua rodean los grupos polares del soluto separando los compuestos en partículas cargadas, aniones y cationes, fenómeno que se denomina **solvatación o hidratación iónica** (Figura 1.3).

Figura 1.3. Se muestra el NaCl en su forma cristalina y cuando está ionizado. Cuando se agrega un compuesto electrolítico, las cargas de la molécula de agua son atraídas por los cationes y los aniones del compuesto. La zona negativamente cargada, el oxígeno de las moléculas de agua, rodeará a los cationes y la zona con carga positiva, los hidrogeniones, rodeará los aniones del compuesto.



Un aspecto muy importante de la función del agua como solvente tiene relación con su participación en la función de las proteínas. Estas tienen una estructura compleja que suele incluir sitios de reconocimiento de otras moléculas y "sitios activos" donde se realizan las transformaciones químicas. Debido a su capacidad de formar enlaces de hidrógeno, el agua puede estabilizar la estructura proteica mediante interacciones con los aminoácidos iónicos y polares con los que tiene contacto en la superficie de la proteína. Se ha demostrado que algunas enzimas pierden su actividad cuando no existe una cantidad suficiente de agua en el medio.

1.1.2 Fuerza de cohesión elevada

Se debe a la presencia de los puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua que las mantiene fuertemente unidas. Esta propiedad hace que el agua sea casi incompresible (no se deja comprimir) y por consiguiente no se modifica su volumen.

1.1.3 Calor específico alto

El calor específico es la cantidad de calor necesaria para aumentar un grado de temperatura a un gramo de agua. Esta propiedad también está relacionada con los puentes de hidrógeno. El agua puede absorber grandes cantidades de calor para romper los puentes de hidrógeno. Cuando se enfría, lo hace lentamente a medida que libera la energía, lo que evita los cambios bruscos en los medios acuosos del organismo.

1.1.4 Alta conductividad térmica

El agua conduce el calor mejor que el aire. Gracias a esta propiedad, el agua iguala rápidamente la temperatura de todos los tejidos y del líquido que rodea las células o líquido extracelular (LEC), favoreciendo la termorregulación al distribuir el calor. De esta manera controla y tiende a equilibrar la temperatura aumentada en los tejidos metabólicamente activos versus los inactivos. Ayuda a disminuir el calor cuando el cuerpo con fiebre se sumerge en agua cuya temperatura esté por debajo.

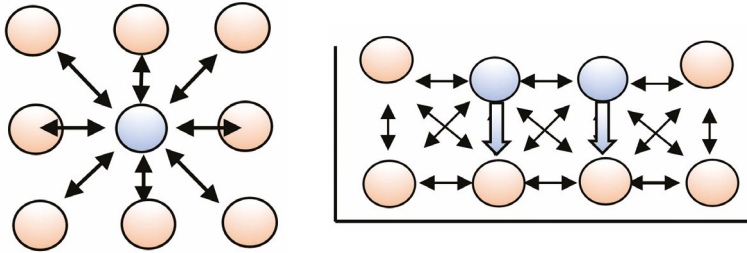
1.1.5 Elevado calor de vaporización

Para evaporar un gramo de agua cuya temperatura inicial sea de 20°C, se requieren 540 calorías, lo que da una idea de la energía que se necesita para romper los enlaces de hidrógeno y aportar la energía cinética suficiente para que las moléculas de agua pasen al estado de vapor.

1.1.6 Tensión superficial

Las moléculas que conforman los líquidos soportan una fuerza de atracción intermolecular muy marcada que las mantiene unidas. Esto se denomina **cohesión**. Estas fuerzas cohesivas (fuerzas de Van der Waals) están compartidas por todas las moléculas (Figura 1.4). Una molécula ubicada en el interior del líquido experimenta fuerzas de atracción de todas sus vecinas, mientras que una molécula de la superficie del líquido, en la interfaz líquido-gas, no tiene moléculas por encima de ella y la fuerza de cohesión es particularmente notoria entre las moléculas de la superficie y de estas con las que están por debajo. El resultado es que las moléculas en la interfaz están sometidas a una fuerza hacia el centro del líquido que no está balanceada del lado de la fase gaseosa. Por lo tanto, el área de la superficie del agua tiende a reducirse al mínimo y así disminuir el desequilibrio de fuerzas. O sea que al disminuir el área superficial, se minimiza el número de moléculas con interacciones "faltantes". Esta tendencia a reducir el área deriva en una tensión en la interfaz líquido-gas, *la tensión superficial*.

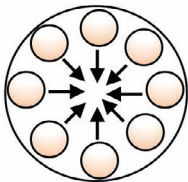
Figura 1.4. Fuerzas de cohesión intermolecular y tensión superficial.



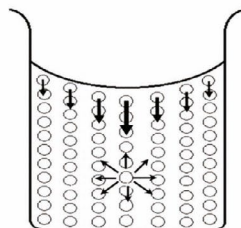
La fuerza neta o resultante sobre las moléculas de la superficie se dirige hacia el centro del contenido líquido, lo que explica la forma redondeada de las gotas de agua y los meniscos que se observan cuando el agua está en un recipiente (Figura 1.5)

Cuando el agua se pone en contacto con moléculas diferentes, las fuerzas de atracción se denominan “*de adhesión*”. El agua contenida en un recipiente de vidrio forma un menisco de concavidad inferior porque las fuerzas de *adhesión* entre las moléculas de agua y las paredes de un tubo de vidrio son más fuertes que las fuerzas *cohesivas* intermoleculares del agua; en tubos delgados (capilares), se desarrolla un mecanismo de ascenso del agua sobre las paredes: *efecto o acción capilar*.

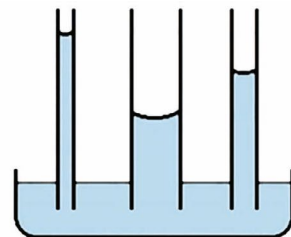
Figura 1.5. Efecto de la tensión superficial: a) las moléculas de agua de la superficie experimentan una fuerza de cohesión que determina la forma redondeada del menisco. b) La fuerza de adhesión del agua con la pared del vidrio es mayor que las intermoleculares.



a) Gota de agua: efecto de la tensión superficial



b) Menisco del agua contenida en un recipiente. Efecto de la tensión superficial y las fuerzas de adhesión.



c) Efecto capilar: las fuerzas de adhesión superan las de cohesión y el líquido asciende por las paredes. A menor diámetro del capilar mayor es la altura de la columna.

La acción o efecto capilar es el resultado de la adhesión de las moléculas de agua y de la tensión superficial: la adhesión del agua a las paredes del tubo origina una fuerza hacia arriba sobre los bordes del líquido y así asciende. La tensión superficial mantiene unida la superficie del líquido de manera que todo el líquido se mueve hacia arriba. La altura final de la columna de agua, depende del peso del líquido (ascenso en contra de la gravedad). El agua realmente “trepa” por el tubo hasta que las fuerzas de cohesión sean iguales a las fuerzas de adhesión⁸.

1.1.7 Densidad del agua

La densidad es una magnitud que hace referencia a la cantidad de masa que está contenida en un determinado volumen. Densidad = Masa / volumen (kg/m^3 o g/cm^3). La densidad relativa de una sustancia es la relación entre su densidad y la de otra sustancia que sirve de referencia. Como es una relación o cociente, es adimensional, es decir no tiene unidades.

En el caso de los líquidos, la **densidad de referencia** es la del agua, en condiciones específicas de presión y temperatura (1 atmósfera y 4°C) y corresponde a $1 \text{ kg}/\text{dm}^3 = 1 \text{ gr}/\text{cm}^3 = 1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$.

El agua tiene una densidad relativa de 1.

1.1.8 Viscosidad dinámica del agua

La viscosidad es una propiedad *de los líquidos en movimiento* y mide la *resistencia interna* al desplazamiento de un fluido. Es medida por el tiempo en que tarda en fluir este a través de un tubo capilar a una determinada temperatura. La resistencia es causada por la fricción intermolecular ejercida cuando las capas de fluidos intentan deslizarse sobre las otras. Equivale a la fuerza desarrollada por 1 dina sobre una superficie de 1 cm^2 a una velocidad de 1 cm por segundo: $\text{dina} \times \text{s}/\text{cm}^2$. A esta unidad se le denomina **Poise** en honor al fisiólogo francés Jean Louis Marie Poiseuille, quien investigó profusamente sobre mecánica de fluidos y flujo de sangre por vasos sanguíneos.

Para el uso práctico, el Poise es una medida grande y es usual dividirlo por 100 y queda como una unidad más pequeña llamada el centipoise (cP).

La viscosidad dinámica del agua a 20,2°C (68,4°F) es 1cP. La viscosidad relativa es la relación que existe entre un líquido comparado con otro que se utiliza como patrón, en este caso el agua a la que se da el valor de 1.

La inmensa mayoría de las reacciones químicas del metabolismo se realiza en disoluciones acuosas. Las propiedades de las soluciones dependen también de las características de los solutos. La clasificación de las soluciones se hace de muchas maneras con criterios que pueden estar definidos por quien clasifica.

¿Qué es una solución?

Una solución es una mezcla homogénea formada por una sola fase, aunque esté conformada por dos o más sustancias⁹.

El tamaño de las partículas disueltas es tan pequeño que no permite separación. Las mezclas homogéneas son aquellas en las que la sustancia disuelta se distribuye uniformemente por toda la mezcla de manera que una muestra tendrá la misma composición que la mezcla total. Su homogeneidad es permanente. Se considera una sola fase debido a la solubilidad de sus componentes, lo cual implica que reaccionan entre sí.

Sin profundizar en todas las propiedades biofísicas de las soluciones se hace necesario revisar los conceptos de *difusión* y de *ósmosis*. La difusión puede ocurrir cuando hay membranas presentes; para ello la membrana debe ser permeable al soluto.

Pregúntese y respóndase

- ¿Qué es un solvente?
- ¿Qué es un soluto?
- ¿Qué es una solución?
- ¿Por qué el agua es el solvente universal?

1.2 Difusión

Es un proceso mediante el cual las moléculas de un soluto tienden a alcanzar una distribución **homogénea** en todo el espacio que les es accesible. La expansión de una sustancia se debe al movimiento caótico de sus partículas que la lleva a ocupar todo el volumen disponible. Cuando las moléculas o las partículas de un soluto están disueltas en un solvente, también están en continuo movimiento al azar.

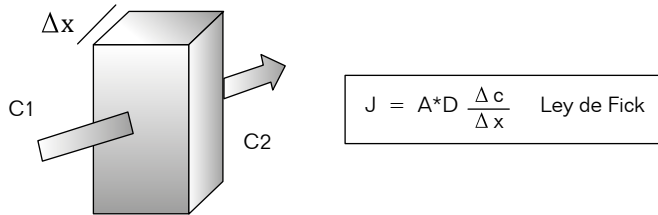
Si en una determinada zona hay mayor concentración del soluto, el choque entre las partículas es más frecuente que donde la concentración es menor. Se presenta un movimiento o flujo neto de partículas hacia la zona menos concentrada. De esta forma, las moléculas del soluto tienden a repartirse homogéneamente en el seno del disolvente, lo cual se alcanza al cabo de cierto tiempo. **Así se logra que cada unidad de volumen tenga la misma concentración de soluto. Se ha logrado el equilibrio.**

1.2.1 Difusión a través de membranas¹⁰

La magnitud de la tendencia a difundir desde una zona a otra **cuando está presente una membrana que separa las dos zonas**, está claramente definida por la **ley de difusión de Fick**, que relaciona el gradiente entre las dos zonas (*gradiente químico o de concentración*), las características de la membrana (*grosor, área de sección transversa, permeabilidad para un determinado soluto*) y si el soluto tiene carga (anión o catión), se debe tener en cuenta el *gradiente eléctrico*.

La ley de Fick expresa que *la velocidad del movimiento de un soluto a través de una membrana (J), es directamente proporcional a la superficie de la membrana (A) y a la diferencia de concentración del soluto entre los dos lados (Dc), e inversamente proporcional al espesor (grosor) de la membrana (Dx)*. Además, la velocidad de la difusión *es proporcional a una constante de difusión (D) que depende de las propiedades de la membrana y de cada soluto en particular. La constante es directamente proporcional a la solubilidad del soluto e*

Figura 1.6. Ley de Fick. Se muestran las variables que componen la ley: A superficie de la membrana; C1 y C2 las concentraciones del soluto a lado y lado de la membrana; Δx , el grosor de la membrana; D, la constante de difusión para el soluto.



Este tipo específico de difusión es el de mayor importancia biológica, porque el intercambio o el paso de solutos y solvente entre la célula y el medio que la rodea, se realiza a través de la *membrana celular* mientras que el paso de solutos entre el plasma y el intersticio se lleva a cabo a través de la *membrana capilar* cuyas características difieren fundamentalmente de la membrana celular.

Una visión sencilla permite considerar las membranas biológicas como estructuras laminares caracterizadas por la presencia de canales o poros de determinadas dimensiones, de tal forma que el comportamiento de una membrana que separe dos soluciones depende fundamentalmente de la relación entre el diámetro de los poros o canales y el diámetro de las partículas o solutos disueltos.

Pregúntese y respóndase

- ¿Qué significa el término gradiente?
- ¿Cuántas clases de gradientes hay?
- Utilice la célula y su contenido iónico para dar ejemplos de gradientes.
- ¿Por qué los líquidos y los gases difunden?
- ¿Qué factores determinan la difusión a través de una membrana?
- ¿Qué se necesita para que un soluto difunda a través de la membrana celular?

1.3 Clasificación de las membranas

De acuerdo con la **permeabilidad de la membrana** (determinada por la presencia o no de poros-canales y por el tamaño de dichos poros o canales, si deja mover solvente o solutos), las membranas se clasifican idealmente en tres grupos fundamentales:

1.3.1 Membranas impermeables

Por sus características no pueden ser atravesadas por el solvente ni por los solutos. En consecuencia no hay movimiento de solutos ni flujo de solvente a través de ellas aunque existan los gradientes, de manera que los compartimientos limitados por una membrana impermeable no se modifican fácilmente. No existen membranas completamente impermeables en el organismo.

1.3.2 Membranas permeables

Permiten el paso de solvente y de los solutos, excepto el movimiento de los solutos muy grandes (de más de 1.000 Å o 100 nm que son los que constituyen las denominadas “dispersiones groseras”. El resto de los solutos y el solvente se distribuye uniformemente a lado y lado de la membrana.

1.3.3 Membranas semipermeables

Idealmente son las membranas que permiten el movimiento libre de solvente pero no de solutos. El agua fluye libremente a lado y lado de la membrana hasta igualar la concentración. El movimiento de agua propiciado por la diferencia de concentración de solutos se denomina **osmosis**. Las membranas celulares clasificadas como semipermeables también son *selectivas*, o sea que permiten el movimiento pasivo de algunos solutos debido a su composición y a la presencia de canales.



Pregúntese y respóndase

- ¿Qué membranas puede identificar en el organismo?
- ¿Alguna de las membranas identificadas por usted es permeable?
- ¿Hay alguna membrana impermeable?
- Busque analogías y diferencias entre la membrana celular y capilar.
- ¿Qué significa que la membrana celular sea “semipermeable”?
- ¿Qué significa que la membrana celular sea “selectiva”?
- ¿La membrana capilar es semipermeable y es selectiva?

1.4 Ósmosis^{12,13}

Se define como el movimiento del solvente a través de una membrana con el fin de igualar la concentración de solutos a lado y lado de la misma. Se presupone entonces que la membrana **es semipermeable** y separa dos soluciones con diferente concentración de solutos. Por lo tanto permite el paso libremente al agua pero NO a los solutos.

En comparación con otras moléculas, el agua se moviliza muy rápidamente a través de la membrana celular debido a la presencia de canales específicos o “acuaporinas”. Por ejemplo, el coeficiente de permeabilidad del agua es 400 veces mayor que el de la úrea, que tiene una permeabilidad muy alta comparada con otras moléculas de importancia biológica.

El agua tiende a atravesar la membrana pasando de la solución **más diluida** (con menos partículas por medida de agua) a la **más concentrada** (con más solutos por medida de agua) hasta alcanzar el equilibrio, el cual se logra cuando las concentraciones de las dos soluciones son iguales. Es decir, el número de partículas por unidad de volumen es igual en los dos lados, sin importar el peso o la carga eléctrica del soluto, únicamente el número de partículas. Los fenómenos osmóticos se producen como consecuencia de la velocidad con que el agua atraviesa una membrana.

Un soluto en solución produce movimiento del agua cuando NO puede atravesar la membrana que lo separa del otro lado y las concentraciones iniciales de dicho soluto son diferentes. A medida que crece la diferencia de concentración entre los lados, aumenta el movimiento de agua hacia el lado donde hay más partículas y el desplazamiento osmótico

será mayor. Se establece un flujo neto de agua hacia el lado que muestra más soluto. El flujo neto continúa hasta igualar las concentraciones del soluto por unidad de solvente.

La fuerza de atracción generada por la solución con más partículas (más concentrada) produce el movimiento del agua, “desplazamiento osmótico”. Si se quiere impedir el paso del agua (evitar el desplazamiento osmótico), se tiene que ejercer una presión (fuerza por unidad de área) en *sentido contrario al movimiento*. Esta presión se denomina “**presión osmótica**”.

La presión osmótica es **función del número de partículas o de moléculas**, cuando la temperatura es constante. También depende de la naturaleza del soluto. Si el soluto *es un electrolito y se ioniza en la solución*, el número de partículas se aumenta en forma proporcional al número de iones resultantes.

El número de partículas de soluto presente en un volumen de agua se puede expresar por medio de una unidad específica denominada “**osmol**”. Cada osmol corresponde a “**un número de Avogadro (6.02×10^{23}) de partículas por unidad de volumen**”. El litro es la unidad común de volumen para el agua.

Hay soluciones cuyo volumen está en parte ocupado por solutos. Por ejemplo, el 7 % del volumen del plasma está ocupado por proteínas. O sea que un litro del plasma (1000 ml de plasma) tiene el 93% del volumen como agua (930 ml). El resto de los solutos que son muy pequeños y en las concentraciones presentes de los líquidos orgánicos ocupan un volumen tan pequeño que puede ser despreciable.

El número de partículas expresado en osmoles por unidad de volumen se denomina **osmolaridad: osmoles / litro de solución**. El número de partículas expresado en osmoles por kilogramo de agua se denomina **osmolalidad: osmoles / kilo de agua**. En los líquidos orgánicos se utiliza indistintamente la osmolaridad o la osmolalidad debido a que 1 litro de agua pesa 1 kilogramo ($P = V \times D$; densidad = 1)



Pregúntese y respóndase

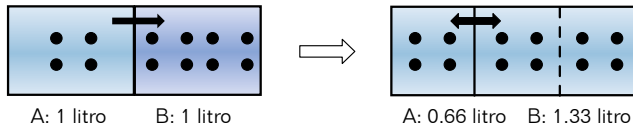
- Defina con sus propios términos el concepto de ósmosis.
- ¿Cuáles son los requisitos para que se pueda presentar la ósmosis?
- ¿Hacia dónde se mueve el agua cuando una membrana semipermeable separa dos soluciones?
- ¿Cuándo se puede afirmar que se ha logrado “equilibrio osmótico”?
- ¿Qué unidad se utiliza para expresar la relación entre número de partículas por unidad de volumen?
- ¿Cuál es la diferencia entre osmolaridad y osmolalidad?
- ¿Cuántas partículas tiene una mol?
- ¿Qué es el “número de Avogadro”?

1.4.1 Presión osmótica

La presión osmótica es la propiedad coligativa que más interesa en el ser vivo, pues se relaciona con la distribución del agua en el organismo. Para comprender el concepto es indispensable recordar que, por definición, una membrana semipermeable es aquella que solo permite el paso de solvente (flujo neto de agua en alguna dirección) y para que haya paso de solvente debe haber diferente concentración de soluto a lado y lado de la membrana.

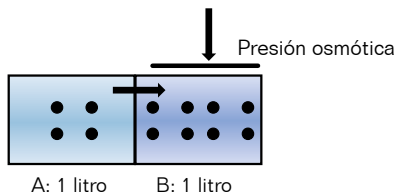
En la gráfica que aparece a continuación (Figura 1.7) se considera un recipiente separado en dos compartimientos por una membrana semipermeable que tienen **el mismo volumen pero diferente cantidad de partículas**. En el lado A hay 4 moléculas de soluto X, mientras que en el lado B hay ocho (8) moléculas del soluto X. Como la membrana es semipermeable y deja pasar solvente, el agua se desplazará desde A hacia B tendiendo a igualar la concentración del soluto. El movimiento del solvente o desplazamiento osmótico ocasiona la disminución del volumen contenido en el lado A y el aumento del volumen del lado B. Así, si el lado A y el B tienen inicialmente 1 litro de agua cada uno, el desplazamiento osmótico reducirá el volumen del compartimiento A hasta 0,66 litros y aumentará el volumen del compartimiento B a 1,33 litros, lo que lleva a que cada compartimiento tenga el mismo número de partículas por unidad de volumen.

Figura 1.7. A la izquierda aparecen dos compartimientos separados por una membrana semipermeable, con igual volumen de agua, pero con diferente concentración de solutos: el lado A tiene la mitad de partículas que el lado B. A la derecha se muestra el resultado del desplazamiento de agua (ósmosis) desde el lado A hacia el lado B, disminuyendo el volumen del lado A y aumentando el volumen del lado B.



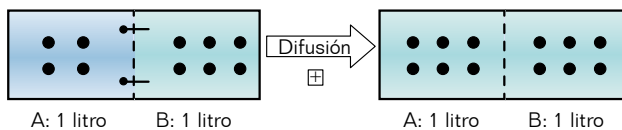
Si se quiere evitar que el agua pase desde el lado A al lado B, se debe ejercer una presión positiva (fuerza por unidad de área) sobre la superficie de B o en la membrana desde el lado B con el fin de evitar el movimiento de agua. La presión que impide el movimiento del solvente se denomina “**presión osmótica**”. (Figura 1.8)

Figura 1.8. Para evitar el desplazamiento del agua del lado A hacia el lado B hay que ejercer una presión en sentido contrario. De esa manera, los volúmenes no cambian y el lado B continúa más concentrado que el lado A.



La condición para que se presente ósmosis es que la membrana sea impermeable a los solutos. Si la membrana de la Figura 1.7 se cambia por una membrana permeable a los solutos, lo que se presenta es difusión de los solutos desde el lado B hacia el lado A sin cambio de volumen y dejando cada compartimiento con seis partículas en el mismo volumen (Figura 1.9).

Figura 1.9. Cuando la membrana es permeable a los solutos, ellos se distribuyen equitativamente y cada compartimiento tendrá el mismo número de partículas sin cambio de volumen.



La definición de **presión osmótica** es la siguiente: “se llama presión osmótica de una solución a la diferencia de presión que debe existir entre la solución y su solvente puro para que esta no pase a través de una membrana semipermeable interpuesta entre el solvente puro y la solución”. También se puede definir como “la fuerza que tiene una solución para producir ósmosis hacia el compartimiento en el cual se encuentra”.

Para una solución acuosa la presión osmótica p (en atmósferas) puede ser calculada por la ecuación:

$$\pi V = n_o RT$$

En esta ecuación V es el volumen en litros de la solución, n_o es el número de moles de partículas de soluto en ese volumen, T es la temperatura absoluta y R es la constante universal de los gases.

Si los líquidos intra y extracelular tienen la misma presión osmótica y no existe flujo neto de agua a través de la membrana celular, la célula no gana ni pierde agua (no se sobrehidrata ni se deshidrata)

Si una solución tiene la misma presión osmótica que el líquido extracelular se denomina solución iso-osmótica. Si es mayor, hiper-osmótica; si es menor, hipo-osmótica.

La fuerza osmótica generada por una diferencia de presión osmótica de 5 mOsm / kg H₂O es casi igual a la presión arterial media (1 mOsm / L = 19,3 mm de Hg).

Pregúntese y respóndase

- ¿Qué se entiende por presión hidrostática?
- ¿Qué se entiende por presión osmótica?
- Si una membrana separa dos soluciones de diferente concentración, ¿cual tiene mayor presión osmótica?
- Para que dos compartimientos tengan diferente presión osmótica, ¿qué tipo de membrana los separa?
- ¿Cómo debe ser la presión osmótica en el interior y el exterior de la célula?

1.4.2. Tonicidad de los líquidos corporales

Cuando se habla de tonicidad de una solución, se hace referencia a un concepto biológico diferente al concepto físico-químico de osmolaridad u osmolalidad, pues la tonicidad no es equivalente a presión osmótica, aunque guarda relación.

Si las células se suspenden en soluciones distintas al líquido extracelular, con diferentes concentraciones de solutos, es posible predecir que se puede presentar una de tres respuestas: no hay flujo neto de agua, la célula gana agua o la célula pierde agua; en los dos últimos casos, hay cambios en el volumen celular.

A partir del concepto de osmolaridad y de presión osmótica, se tiende a creer que si las células están rodeadas por soluciones iso-osmolares no hay flujo neto de agua; si las soluciones que rodean la célula son hiper-osmolares se produce desplazamiento osmótico desde el interior de la célula y si son hipo-osmolares provocan desplazamiento de agua hacia el interior de las células

Como la membrana celular no corresponde con la definición de una membrana idealmente semipermeable, deja pasar algunos solutos en uno u otra dirección (selectiva), produciendo cambio del volumen celular al mover simultáneamente agua.

La tonicidad de una solución hace referencia al cambio del volumen celular que produce una solución que rodea la célula; para ello, además de tener en cuenta la osmolaridad de las soluciones intra y extracelulares, hay que analizar “el coeficiente de reflexión” de los solutos presentes en los dos compartimientos. La tonicidad no está determinada únicamente por el número de partículas; también hay que considerar las que difunden a través de la membrana.

El tipo de respuesta celular define la tonicidad: **si no hay cambio de volumen es isotónica, si aumenta el volumen de la célula es hipotónica; si disminuye el volumen celular es hipertónica**. Esta respuesta no siempre coincide con la osmolaridad de la solución.

Un ejemplo de lo anterior se puede observar cuando se incuban eritrocitos en una solución 0,5 M de úrea, cuya osmolalidad es de 500 mOs/Kg (sería hiperosmolar con relación al plasma). Se observa que los eritrocitos aumentan su volumen como resultado del desplazamiento de agua hacia el interior, secundario a la difusión de la úrea y

rápidamente se hemolisan. Esto ocurre porque la membrana celular es permeable a la úrea, que es un soluto “penetrante”, cuyo “coeficiente de reflexión” se acerca a cero. De acuerdo con la respuesta celular, **la solución hiperosmolar de úrea es hipotónica porque aumenta el volumen celular.**

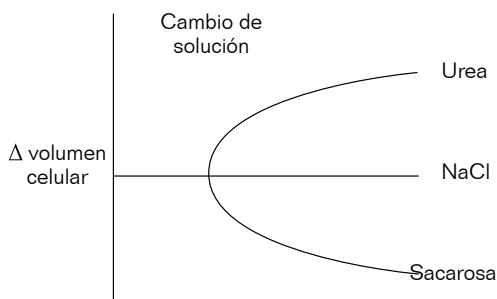
¿Qué es el coeficiente de reflexión (σ) o coeficiente de Staverman? La capacidad de penetración de un soluto a través de una membrana se expresa en el coeficiente de reflexión, término acuñado por Staverman para expresar matemáticamente la permeabilidad de una membrana a un soluto^{14, 15}.

¿Por qué de reflexión? Porque este coeficiente se expresa en relación con la fracción de las moléculas de soluto que al moverse y chocar contra la membrana, no la atraviesan y se “reflejan” hacia el mismo compartimiento. Si la reflexión es total, la membrana es **impermeable** al soluto y el coeficiente de reflexión σ es igual a 1. Si la membrana es totalmente **permeable** al soluto, el coeficiente de reflexión σ , vale 0. Para la úrea, el coeficiente de reflexión está entre 0.2 y 0.3, lo que indica que atraviesa la membrana fácilmente.

Utilizando nuevamente la úrea, se puede analizar otro ejemplo que muestra la diferencia entre osmolaridad y tonicidad. En este caso, se compara el cambio de volumen de las células cuando se sumergen en soluciones “iso-osmolares” de úrea, de NaCl y de sacarosa (Figura 1.10) Con el tiempo, el volumen de la célula sumergida en una solución de úrea se aumenta (solución hipotónica), mientras que la célula sumergida en una solución de sacarosa pierde volumen (hipertónica) y no cambia cuando está sumergida en la solución de NaCl (isotónica). Lo que determina la diferencia de tonicidad entre las tres soluciones iso-osmolares es el coeficiente de reflexión: $\sigma_{\text{sacarosa}} > \sigma_{\text{NaCl}} > \sigma_{\text{urea}}$. La membrana celular es permeable a la úrea pero impermeable a la sacarosa.

El término **tonicidad** que se asemeja a osmolaridad pero no es lo mismo, se refiere al efecto de las diferentes concentraciones de solutos en el líquido extracelular sobre el volumen celular; es un término funcional que da cuenta de la tendencia de una solución para producir aumento o disminución del volumen de las células. Con frecuencia se utilizan indistintamente pero se debe recordar que la tonicidad hace referencia a la osmolaridad efectiva, es decir, a la que determina el movimiento de agua a través de la membrana celular para igualar la osmolaridad.

Figura 1.10. Se muestran los cambios de volumen producidos en las células al contacto con soluciones iso-osmolares con distintos coeficientes de reflexión (σ). Cuando las células se rodean de una solución de NaCl iso-osmolar, el volumen no cambia. La flecha muestra el momento en que las células se exponen a soluciones diferentes y el volumen cambia en función del tiempo. La solución de úrea es iso-osmolar pero hipotónica; la solución de NaCl es iso-osmolar e isotónica; la solución de sacarosa es iso-osmolar pero hipertónica.



Dos soluciones son *iso-osmóticas* cuando tienen el mismo número de partículas disueltas, independientemente de si el agua puede pasar a través de membrana, pero son *isotónicas* cuando no producen movimiento de agua a través de la membrana independientemente del número de partículas que tengan disueltas.

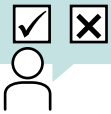
La isotonía es fundamental para el mantenimiento del equilibrio entre los componentes de los corporales (líquidos intra y extracelular, ver más adelante).

Se consideran isotónicas (también iso-osmolares) a las soluciones de NaCl al 0,9% o de glucosa al 5%, ya que no alteran el equilibrio osmótico de los líquidos corporales cuando son inyectadas por vía intravenosa, es decir, no producirán desplazamiento osmótico en ninguna dirección a través de la membrana. Lo que ocurre con la glucosa al 5% es que como se metaboliza por cualquiera de las vías, el efecto final es de una solución hipotónica.

Pregúntese y respóndase

- ¿Cuál es la diferencia entre osmolaridad y tonicidad?
- ¿Por qué una solución iso-osmolar puede ser hipo o hipertónica?
- ¿Por qué razón la úrea se considera "osmol inefectivo"?
- ¿Cuál es la diferencia entre la úrea y la sacarosa en relación con la membrana?

AUTOEVALUACIONES Y TALLERES



Estos talleres han sido diseñados para apoyar su aprendizaje. Lea cuidadosamente cada pregunta y analice las opciones. Trate de seleccionar la respuesta más acertada. Sustente su respuesta. **Algunas veces puede encontrar más de una opción.** ¡No se quede con dudas! ¡Analice, investigue, pregunte!

1. Teniendo en cuenta la estructura de la molécula de agua, se puede afirmar correctamente que:
 - a. Es una molécula neutra eléctricamente porque tiene la misma cantidad de cargas positivas y negativas
 - b. Es una estructura asimétrica que la convierte en estructura polarizada.
 - c. A pesar de ser neutra, tiene un polo positivo y uno negativo
 - d. El oxígeno de la molécula se comporta como un polo negativo debido a los electrones libres
 - e. Todas las afirmaciones son correctas.

2. Para que una molécula de agua se acople con otra, se requiere lo siguiente, EXCEPTO:
 - a. Establecer enlaces covalentes
 - b. Atracción entre los polos de carga semejante
 - c. Formación de puentes de hidrógeno
 - d. Inhibición de la interacción dipolo-dipolo
 - e. La A y D

3. El agua se considera el “**solvente universal**” porque:
 - a. Forma puentes de hidrógeno con otras sustancias
 - b. Puede orientar la porción parcialmente cargada de la molécula hacia el ion en respuesta a la atracción electrostática
 - c. Muestra una capacidad alta de rodear cada partícula separándola del resto
 - d. Presenta una constante dieléctrica alta
 - e. Todas son correctas

4. Con relación a **la tensión superficial** es correcto afirmar que:
 - a. Es la fuerza intermolecular que experimentan todas las partículas de un líquido
 - b. Se manifiesta únicamente en las interfaces líquido-gas
 - c. Es menor en las moléculas centrales de un líquido almacenado en un recipiente
 - d. Es igual en todos los líquidos
 - e. Es independiente de la naturaleza del líquido

5. Con relación a la difusión es correcto lo siguiente, EXCEPTO:
 - a. Se presenta cuando hay gradiente de concentración
 - b. Iguala la concentración de un soluto en una solución
 - c. Depende del choque de las partículas
 - d. Ocurre cuando está presente una membrana permeable al soluto
 - e. Solamente se observa en soluciones acuosas

6. La membrana celular cumple con la propiedad biofísica de ser una **membrana semipermeable**. Por definición una **membrana semipermeable** es
 - a. La que deja movilizar solamente solutos

- b. La que permite el paso de solutos y de solvente
 - c. La que permite el paso de solvente y de algunos solutos
 - d. La que permite el paso de solvente únicamente
 - e. Ninguna es correcta
7. Si se completa la descripción de las características de la membrana celular, se debe aclarar que es una membrana selectiva semipermeable. Con esto se quiere explicar que:
- a. Permite el paso de solutos y solvente
 - b. Deja movilizar solamente solutos
 - c. Permite el paso de solvente y algunos solutos
 - d. Deja movilizar solvente únicamente
 - e. Ninguna es correcta
8. El movimiento de solutos a través de una membrana semipermeable selectiva por mecanismo pasivo se denomina:
- a. Ósmosis
 - b. Transporte facilitado
 - c. Difusión simple
 - d. Transporte activo primario
 - e. Arrastre por solvente
9. Para que ocurra movimiento pasivo de solutos (difusión simple) a través de una membrana, se requiere la presencia de receptores específicos en ella.
- a. Verdadero
 - b. Falso
10. Con relación a la distribución y movilización de iones entre el interior y el exterior de la célula, defina:
- a. Gradiente de concentración
 - b. Gradiente eléctrico
11. El ion que se encuentra **en mayor proporción en el interior de las células es:**
- a. El potasio

- b. El sodio
- c. El calcio
- d. El cloro
- e. Los fosfatos

12. El ion que se encuentra en mayor proporción por fuera de las células es:
- a. El potasio
 - b. El sodio
 - c. El calcio
 - d. El cloro
 - e. Los fosfatos
13. Las concentraciones intra y extracelulares de los siguientes iones, expresadas en mEq / litro son:

ION	LEC	LIC
Sodio		
Potasio		
Cloro		
Bicarbonato		
Calcio		
Magnesio		
Fosfatos		
Hidrogenión		

14. Tenga en cuenta la carga y la concentración intra y extracelular de un ión y señale el gradiente eléctrico y químico para cada uno de ellos. Recuerde que la célula está cargada negativamente. Use el ejemplo del sodio:

ION	Eléctrico	Químico
Sodio	Hacia la célula	Hacia la célula
Potasio		
Cloro		
Bicarbonato		
Calcio		
Magnesio		
Fosfatos		
Hidrogenión		

15. Los iones se distribuyen en el interior y el exterior de la célula por mecanismos pasivos, activos e inherentes a las características de la membrana. **Por mecanismos activos** se determina la distribución de:
- El potasio
 - El sodio
 - El cloro
 - El bicarbonato
 - El hidrogenión
16. Cuando una membrana semipermeable separa dos compartimientos con diferente concentración de solutos, ocurrirá:
- Paso de solutos hasta igualar la concentración a lado y lado
 - Movimiento de solvente del lado más concentrado al menos concentrado
 - Movimiento de solutos y de solvente
 - Paso de solvente desde donde haya más cantidad de él hacia el lado contrario
 - No pasan los solutos ni el solvente
17. El mecanismo seleccionado por usted en la pregunta anterior, se denomina:
- Difusión simple
 - Difusión facilitada
 - Gradiente de presión
 - Ósmosis
 - Movimiento activo
18. ¿Qué mecanismos **diferentes a la difusión simple** conoce usted para explicar el movimiento de solutos a través de la membrana celular? Explique cada uno.
19. El **movimiento pasivo de un soluto a través de la membrana celular** depende de varios factores (Ley de Fick). Enúncielos y explique.
20. En la membrana celular existen diferentes tipos de proteínas. Defina y diferencie:
- Bomba
 - Canal
 - Receptor
21. Repase y describa el funcionamiento de algunos canales presentes en la membrana de las células. Recuerde que hay canales que son dependientes de **voltaje** y otros que son **dependientes de concentración**. Revise también el comportamiento de las compuertas.
- **Canales de sodio**

 - **Canales de potasio**

 - **Canales de calcio**

 - **Canales de cloro**

22. Si una membrana separa dos compartimientos que contengan una solución, ¿qué características deben existir para que entre los dos compartimientos se ejerza una presión que desplace agua?
23. ¿Qué son fuerzas de adhesión y qué son fuerzas de cohesión?
24. ¿Cuál es la diferencia entre una solución "iso-osmótica" y una solución "isotónica"? Dé algún ejemplo que ilustre y justifique su respuesta.

25. ¿Qué se entiende por coeficiente de reflexión o coeficiente de Staverman?
26. ¿Qué puede ocurrir si un eritrocito se sumerge en una solución hipotónica o en una hipertónica?

* La constante dieléctrica es una medida de las propiedades de un solvente para mantener cargas opuestas separadas. A medida que la constante dieléctrica del solvente crece, la fuerza entre las cargas decrece.

Capítulo 2

Distribución del agua - compartimientos hídricos



Objetivos

Una vez finalizado el capítulo, el estudiante estará en capacidad de:

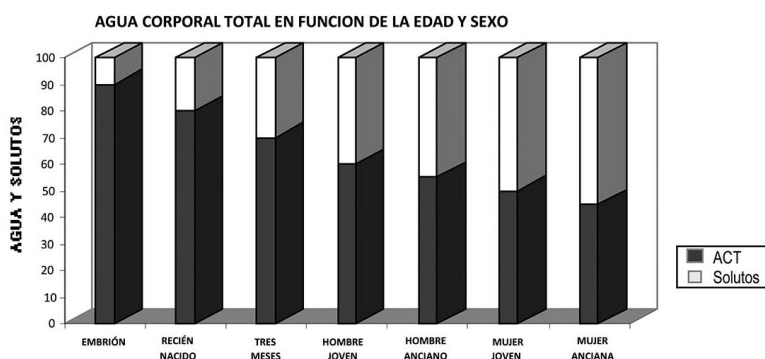
1. Definir el término Agua Corporal Total (ACT) y señalar su relación con las variables fisiológicas como la edad, el sexo y las diferencias constitucionales o biotipos.
2. Explicar el concepto de “compartimiento” y describir la distribución del agua en compartimientos de acuerdo con las características de las membranas que los limitan.
3. Analizar la diferencia de la distribución hídrica de acuerdo con la edad y con el sexo e inferir sus repercusiones.
4. Identificar la composición de los compartimientos señalando las diferencias más importantes entre ellos.
5. Calcular la proporción y el volumen de los compartimientos en condiciones normales.
6. Analizar los cambios en el volumen de los compartimientos cuando hay pérdida de líquidos.
7. Explicar la forma como se determina el volumen de los compartimientos por el método de la dilución utilizando indicadores.
8. Aplicar los conceptos teóricos a problemas sencillos que permitan su comprobación.

2. Distribución del agua - compartimientos hídricos

El medio acuoso interior en el que se desenvuelve la vida permite considerar el organismo vivo como una gran disolución que está compuesta por *solvente* (el agua) y *solutos* (electrolitos, iones, sustancias orgánicas, etc). La proporción de los dos componentes varía, pero el agua es el componente más abundante del cuerpo humano en cualquier edad y condición normal. Toda el agua que conforma un organismo vivo se denomina **Agua Corporal Total (ACT)** y puede ser expresada de varias formas, la más útil de ellas es la relación entre el peso corporal total y el porcentaje o la proporción de agua. La suma de los solutos de cualquier naturaleza corresponde al componente no acuoso que completa el peso total del organismo y se expresa también proporcionalmente.

El contenido de **Agua Corporal Total (ACT)** de un adulto normal **fluctúa entre el 50% al 70% de su peso corporal**. Como promedio se toma 60%¹⁶. El porcentaje restante del peso, **entre el 30% al 50%, corresponde a los solutos secos**. Sin embargo, la proporción de ACT **no es constante durante toda la vida**: varía con dos condiciones fisiológicas básicas que deben ser tenidas en cuenta siempre: **la edad y el sexo** (Figura 2.1).

Figura 2.1. Variaciones en el contenido de ACT y solutos relacionadas con la edad y con el sexo.



La edad: la proporción de agua corporal con relación al peso disminuye con el aumento de la edad. La mayor proporción de agua en el humano se encuentra en las primeras

semanas de desarrollo embrionario, ya que la diferenciación celular apenas se está iniciando, así como el crecimiento de las estructuras intracelulares que acompañan tal diferenciación. **Por lo tanto se acepta que el 90% del peso del embrión es agua.** El 10% restante corresponde a otro tipo de componentes (o solutos) diferentes del agua. A medida que el embrión se va desarrollando aumenta la proporción de solutos y la relación con el agua se modifica progresivamente. **Cerca de la semana 27 de gestación,** 86% del peso corporal es agua, 12% es de solutos secos libres de grasa y solo el 2% es grasa. **El recién nacido a término** (38 a 42 semanas de gestación) muestra una proporción de agua ligeramente menor debido al desarrollo celular que se ha presentado durante la vida intrauterina. **Se considera que varía entre el 75 al 80% de su peso** (Figura 2.2).

Con el crecimiento y el aumento de la edad, el ACT continúa disminuyendo. **Hacia el tercer mes de vida postnatal el ACT se acerca al 70% del peso del lactante.** Durante **la primera y la segunda infancia,** la proporción de ACT es casi únicamente función del estado nutricional y la constitución física del niño. **Cuando se inicia la secreción de hormonas sexuales durante la adolescencia** se establecen las diferencias debidas al sexo, las cuales permanecen durante varios años con pequeñas variaciones relacionadas con el contenido de tejido graso. Con el proceso del **envejecimiento,** muchas funciones declinan y se presentan cambios inherentes a la edad: disminuye la tasa de filtración en el glomérulo renal, la capacidad de concentración renal decrece, la caída progresiva de la secreción hormonal, la desecación de los tejidos, la disminución de la actividad física acompañada de pérdida del tropismo muscular (hipotrofia muscular), etc., conducen a una pérdida adicional del 5% del ACT.

Figura 2.2. Porcentaje de agua corporal total (ACT) en un adulto promedio comparada con el ACT de un recién nacido a término: En el adulto, 3/5 partes de su peso, o sea el 60%, es agua; el resto son solutos. Del peso de recién nacido, 4/5 partes o sea el 80% es agua y el resto, 20%, son solutos.



- **El sexo:** por la acción metabólica de las hormonas sexuales aparecen diferencias importantes entre hombres y mujeres al iniciarse la adolescencia. Estos cambios incluyen la composición hídrica. **Los andrógenos** estimulan la síntesis proteica, el aumento de masa muscular y los cambios corporales típicos de esta etapa. La

grasa corporal disminuye. *El hombre adulto normal muestra un contenido de ACT de 60% a 65% de su peso. Los estrógenos redistribuyen el tejido graso pero no necesariamente lo disminuyen. El ACT de una mujer adulta normal fluctúa entre el 50% al 60% del ACT.*

Como el contenido o la proporción de agua de un individuo se relaciona con el peso corporal, hay que tener en cuenta que el peso ideal se indica teniendo en cuenta las categorías constitucionales, somatotipos o biotipos, aunque no existen criterios generales claros y válidos para la clasificación de una persona en cualquiera de estas categorías. Aceptando una clasificación extremadamente simple, la proporción del ACT puede ajustarse aproximadamente a los valores de la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1. Cambios en el porcentaje de ACT según constitución física.



	% ACT	
	Hombre	Mujer
Delgado	65	55
Promedio	60	50
Sobrepeso	= o < 55	= o < 45

El peso corporal está determinado principalmente por tres componentes: la cantidad de agua, el contenido de grasas y la masa muscular. La proporción de los componentes difiere marcadamente entre un hombre y una mujer adultos y dicha diferencia está determinada por las secreciones hormonales. Modificaciones del peso corporal se acompañan de cambios de estos tres componentes, aisladamente o combinados. En la **tabla No. 2.2** se muestra claramente cómo se relacionan el sexo, la edad y la distribución promedio de estos tres componentes. Arbitariamente se han denominado como tejidos de sostén a los tejidos diferentes al adiposo con el fin de resaltar el efecto de la grasa.

El tejido adiposo es el más variable de todos los componentes, con fluctuaciones que desbordan los rangos fisiológicos y van desde el 5 al 50%, aunque se considera que el rango normal es de 10% a 30%. El agua suele ser responsable de la mayoría de las oscilaciones del peso corporal en plazos breves. El compartimiento graso, después del hídrico, es el más variable con los cambios de estado nutricional.

Cuando se observa el contenido porcentual de ACT en un grupo de individuos con condiciones semejantes de edad y sexo, es posible encontrar variaciones que se relacionan principalmente **con la proporción de grasa del organismo**. Como el contenido de agua del tejido adiposo es relativamente bajo (10%) mientras que en el músculo es muy alto (>70%), *quienes tengan mayor proporción de grasa, tendrán menor proporción de agua*.

Tabla 2.2. Porcentaje aproximado que corresponde a la distribución de agua y solutos según sexo y edad. Se resalta la importancia del tejido adiposo en el contenido de agua corporal total.

	Hombre adulto	Mujer adulta	Hombre anciano
Agua corporal total	60%	55%	55%
Tejido adiposo	15%	30%	30%
Demás tejidos (de sostén)	25%	15%	15%
Peso total	100%	100%	100%

El contenido de Agua Corporal Total (ACT) presenta muy poca variabilidad y es fijo si se considera de forma aislada en un individuo en particular. La constancia en el peso corporal de un día a otro es evidencia del equilibrio hídrico que se realiza constantemente para mantener las condiciones internas, a pesar de los continuos ingresos y de los egresos de agua durante un período de 24 horas.



Pregúntese y respóndase

- ¿Cuánta agua, en promedio, tiene un adulto normal?
- ¿Qué es Agua Corporal Total (ACT)?
- ¿Cómo se denomina el componente del cuerpo que no corresponde al ACT?
- ¿Qué factores determinan el contenido de ACT?
- En el sexo masculino, ¿qué factor hormonal determina diferencias en el contenido de ACT?
- ¿De qué forma los biotipos o somatotipos determinan el ACT del cuerpo humano?
- Relacione el ACT con el contenido de grasa de un individuo.
- ¿A qué se atribuyen las diferencias en el ACT entre un adulto y un recién nacido?
- ¿Qué determina la proporción de ACT del anciano comparada con la del adulto?

2.1 Distribución del agua corporal total: compartimentos hídricos

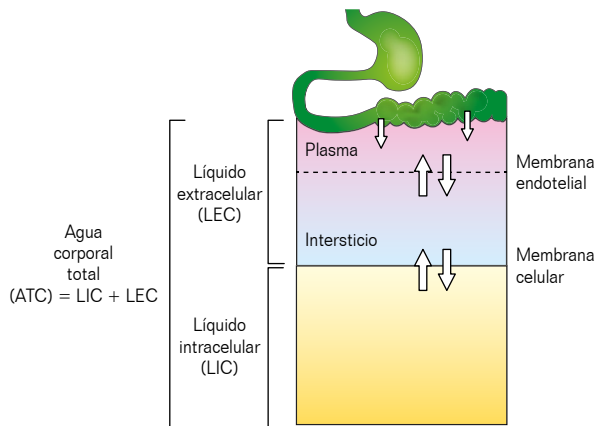
¿Qué es un compartimiento?

Un *compartimiento* se puede definir como un espacio real o virtual que está constituido por elementos que comparten una o más características comunes, las cuales permiten agruparlos y analizarlos tomando como punto de partida dichas características y no necesariamente con ubicación física definida y limitada. El compartimiento resulta entonces de la suma de los componentes que compartan iguales características.

La presencia de membranas en los sistemas biológicos establece el concepto de **compartimentos**, cuyos límites están definidos por ellas. En este caso, la membrana que separa un compartimiento de otro es una barrera física de cuyas características depende el intercambio de agua y de solutos. Pero no todos los compartimientos tienen un límite físico; el poseer elementos comunes permite considerarlos como tal. Así, el compartimiento muscular agrupa todos los tipos de músculos, el compartimiento medular agrupa las células sanguíneas en formación, etc.

En los organismos multicelulares, los compartimentos hídricos están separados por membranas que los definen anatómica y funcionalmente^{17,18}. Es así como el Agua Corporal Total (ACT) se distribuye en varios compartimientos limitados por la presencia y características de las membranas (**Figuras 2.3 y 2.4**).

Figura 2.3. Compartimientos hídricos determinados por la presencia de membranas. El ACT está conformada por dos compartimientos: Líquido Intracelular LIC, y Líquido Extracelular, LEC, separados por la membrana celular, semipermeable y selectiva; el agua se mueve libremente para mantener la osmolaridad; la selectividad se relaciona con el movimiento pasivo de algunos solutos. El LEC está compuesto por dos compartimientos separados por la membrana endotelial, permeable a casi todos los solutos, excepto a las proteínas; permite el movimiento por difusión de los solutos de manera que la composición de los dos compartimientos extracelulares, plasma e intersticio, es muy semejante.



- a. **La membrana celular** origina dos compartimientos (**Figura 2.4**):
- **el Intracelular:** resulta de la suma de todos los componentes localizados en el interior de las células. Corresponde en el adulto a 2/3 del ACT (33.33 - 46.66% del ACT).
 - **el Extracelular:** compuesto por los componentes que hay por fuera de la membrana celular. Es 1/3 del ACT (16,66 - 23,33% del ACT).

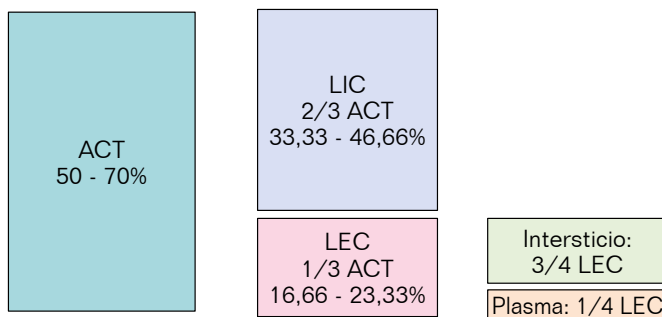
La distribución del agua del ACT entre el LIC y el LEC es pasiva y está determinada por el número de partículas osmóticamente activas en cada compartimiento. Estos dos compartimientos tienen una alta proporción de agua que se intercambia y moviliza para mantener la concentración de solutos igual a lado y lado de la membrana. Los solutos liposolubles no unidos a proteínas y algunos iones para los que existen canales se movilizan libremente, por gradientes, a través de la membrana celular. El resto de los solutos necesitan mecanismos de transporte específicos y como consecuencia, la diferencia entre el LIC y el LEC es muy marcada.

$$\text{Por lo tanto: ACT} = \text{LIC} + \text{LEC}$$

- b. **La membrana capilar** o endotelio capilar separa el LEC en dos:
- **el intersticial:** está en contacto con la membrana celular y es aproximadamente $\frac{3}{4}$ del LEC en el adulto.
 - **el plasma:** es el componente extracelular de la sangre y corresponde a un $\frac{1}{4}$ del LEC.

Las propiedades y características de cada compartimiento están determinadas por la naturaleza de la membrana que lo limita. Como la membrana celular es *semipermeable y selectiva*, la diferencia en la composición del compartimiento intracelular y del extracelular depende en muy buena parte de dichos atributos. El endotelio capilar difiere sustancialmente de la membrana celular, su *permeabilidad es mayor* y los compartimientos extracelulares son semejantes en muchos aspectos.

Figura 2.4. Compartimientos hídricos de un adulto normal expresados en fracción y en porcentaje del peso corporal.



Como la casi totalidad de las barreras que separan compartimientos del cuerpo son permeables al agua, esta se mueve libremente a través de ellas y en estado estacionario el organismo muestra una característica muy importante: ***cada unidad de volumen tiene el mismo número de partículas (es iso-osmótico).***

La distribución promedio del ACT de un adulto de 70 kilogramos de peso se muestra a continuación:

	ACT	LIC	LEC	Intersticio	Plasma
% del peso	60	40	20	15	5
Volumen (litros)	42	28	14	10.5	3,5

2.1.1 Líquido Intracelular (LIC)¹⁹

Es el resultado de la suma de toda el agua que compone las células del organismo. Es un compartimiento discontinuo y muy heterogéneo en cuanto a los contenidos intracelulares. Las células tienen diversos componentes de acuerdo con su función, pero todas muestran semejanza en cuanto a su contenido iónico: el principal catión es el potasio y el principal anión corresponde al grupo de los fosfatos orgánicos e inorgánicos. Hay poco sodio y casi no hay cloro. El contenido de bicarbonato es casi la tercera parte del que hay por fuera de la célula. Todas las células vivas están cargadas negativamente con respecto al líquido que las rodea.

La membrana celular es el límite físico que circunscribe el compartimiento intracelular. Las diferencias entre el LEC y el LIC se pueden atribuir a varios factores relacionados con ella: las bombas Na-K-ATPasa de las membranas celulares, las características de permeabilidad de la membrana y las características propias de cada célula.

**En un adulto normal el LIC corresponde a 2/3 partes del ACT.
Representa del 33 al 46% del peso corporal.
En el recién nacido, el LIC corresponde a 1/2 del ACT.**

La proporción de agua de las células vivas varía de una a otra. Hay tejidos con alta proporción de agua, el tejido nervioso por ejemplo con 80%; otros con muy baja cantidad de agua, como la dentina con el 10%.

En la **Tabla 2.3** se muestran otros tejidos y su proporción de agua.

Tabla 2.3. Contenido de agua expresado en porcentaje en algunos tejidos del organismo.

Tejido	% Agua
Riñón	83
Corazón	79
Pulmones	79
Musc. esquelético	76
Encéfalo	75
Piel	72
Hígado	68
Óseo	22
Adiposo	10

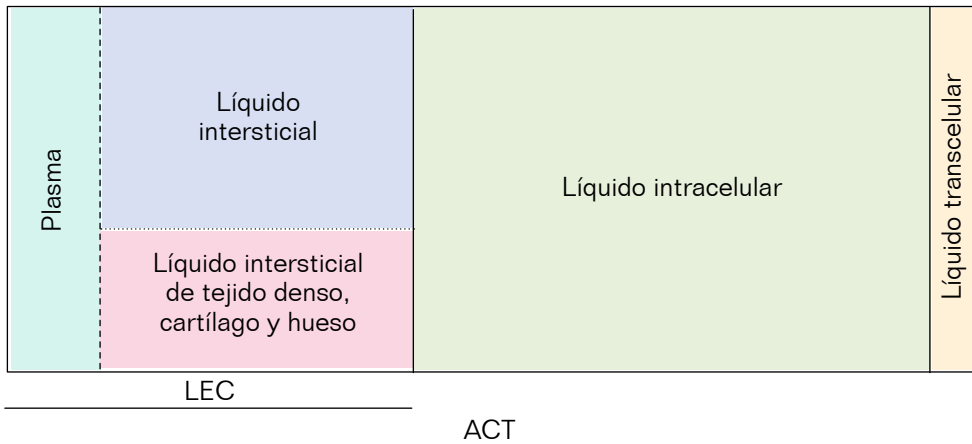
2.1.2 Líquido extracelular (LEC)

Es todo el líquido que se localiza por fuera de la membrana celular rodeando las células. Está separado del LIC por la membrana celular. El LEC es el compartimiento que recibe el impacto de los intercambios con el medio ambiente. Lo que debe llegar hasta el interior de la célula debe necesariamente atravesar el compartimiento extracelular. De igual forma, lo que se debe eliminar de la célula pasa al LEC y luego al exterior por cualquiera de las vías de excreción.

El LEC, integrado por el intersticio y el plasma, es bastante uniforme en su composición. El sodio y su complemento de aniones, principalmente cloruro y bicarbonato, constituyen la casi totalidad de los solutos iónicos que determinan la osmolaridad. El calcio, magnesio, potasio, fosfato y sulfato se encuentran en concentraciones relativamente bajas. Aunque cada uno de ellos es importante por razones fisiológicas, tienen poca importancia desde el punto de vista osmótico y por consiguiente en la distribución de los líquidos.

Como el agua que se encuentra en el tejido conectivo denso, en el cartílago y en el hueso haciendo parte del LEC no se intercambia rápidamente, como ocurre con los demás tejidos, se muestra separada para indicar que puede tener un manejo diferente (Figura 2.5).

Figura 2.5. El agua que compone el intersticio del tejido conectivo denso, el hueso y el cartílago, se intercambia muy lentamente con el resto del líquido extracelular debido a las características propias de estos tejidos. Con frecuencia esta fracción de líquido intersticial se estudia separadamente y conviene recordar que el desplazamiento osmótico entre plasma y el intersticio y viceversa, es rápido y muy ágil.



En un adulto normal, el LEC corresponde a 1/3 del ACT.
 Representa del 16 al 23% del peso corporal
 En el recién nacido el LEC corresponde a 1/2 del ACT.

El líquido extracelular comprende:

- El agua localizada en los intersticios de las células (líquido intersticial).
- El agua del plasma.

Por lo tanto: LEC = Volumen Intersticial + Volumen Plasmático

2.1.2.1 El líquido intersticial

El compartimiento del líquido intersticial también es discontinuo y heterogéneo. Resulta de la suma de todos los intersticios de los diversos tejidos del organismo que difieren unos de otros. Está en contacto con la membrana celular y con la membrana endotelial.

Es el paso intermedio obligado de los solutos y el solvente desde el plasma hacia la célula o desde la célula al plasma y se origina por filtración y ósmosis. Las células sanguíneas no poseen intersticio.

Los solutos del líquido intersticial son los mismos del plasma, pero en el intersticio las proteínas o las sustancias unidas a ellas se encuentran en cantidades muy bajas, lo que provoca redistribución de los iones difusibles de acuerdo con el equilibrio de Gibbs-Donnan que considera que *“la presencia de proteínas (aniones NO difusibles) en uno de los compartimientos (plasma) produce una redistribución de los iones difusibles acompañada por desplazamiento de agua: una vez logrado el equilibrio osmótico también se recupera la neutralidad eléctrica de cada compartimiento”*. En el capítulo 4 aparece la clara explicación del equilibrio de Gibbs-Donnan.

El intersticio contiene además dos tipos de estructuras sólidas importantes para mantener sus características: las fibras de colágeno que son muy fuertes y aportan la fuerza tensional; y los filamentos de proteoglicanos, reticulares, compuestos por ácido hialurónico (98%) y proteínas (2%). El componente líquido del intersticio queda atrapado entre los filamentos de proteoglicano y adquiere características de gel y no fluye fácilmente. La cantidad de líquido “libre”, que se moviliza fácilmente, es menos del 2% del líquido intersticial y aumenta en casos de edema.

2.1.2.2 El plasma

El plasma es el componente extracelular de la sangre. Tiene una composición semejante al intersticio en la cual el catión predominante es el Na^+ y los aniones predominantes son en su orden el Cl^- y el HCO_3^- . La permeabilidad del endotelio permite el movimiento por difusión de la mayor parte de los solutos, hasta lograr su distribución casi uniforme, lo que determina concentraciones muy parecidas en el plasma y en el intersticio.

La gran diferencia entre los dos compartimientos extracelulares la constituye la mayor concentración de proteínas del plasma. Esta diferencia se debe a que el endotelio es libremente permeable al agua y a solutos pequeños de bajo peso molecular (llamados cristaloideos), tales como los iones inorgánicos, la glucosa, aminoácidos, la urea, etc., pero tiene una permeabilidad muy limitada a solutos de mayor tamaño (coloides) como las proteínas y algunos lípidos de peso molecular alto unidos a proteínas.

Los únicos solutos que ocupan parte del volumen del plasma son las proteínas: de un volumen dado de plasma, el 93% está ocupado por agua y el 7% por proteínas plasmáticas y una pequeña cantidad de lípidos.

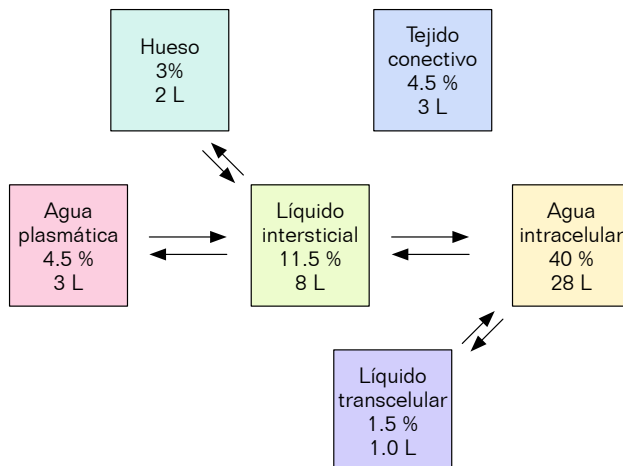
2.1.3 Líquidos transcelulares

Forman un grupo heterogéneo de líquidos especiales y cada uno de ellos es relativamente único, de manera que no es posible generalizar en lo que se refiere a su composición. En su formación participan las células pero su composición final no es semejante al LIC ni al LEC. Están separados del LEC por una capa de células epiteliales que pueden participar en su formación. Hacen parte de este grupo las secreciones digestivas, el líquido céfalo-raquídeo, el humor vítreo, el humor acuoso, el líquido intra-articular, el intrapleural, el peritoneal, etc. Muchos de ellos se encuentran ubicados en espacios cerrados y no se intercambian fácilmente con otros líquidos del organismo, ni permiten la difusión de los solutos que los componen.

El compartimiento transcelular corresponde al 1,5% del peso

Al tener en cuenta las anotaciones que se han hecho respecto a la distribución de los líquidos en el organismo y los intercambios entre ellos, surge una representación que incluye una disposición diferente del líquido extracelular y en particular, del intersticio. La Figura 2.6 muestra la distribución del ACT para un adulto de 70 kilogramos, teniendo en cuenta los criterios descritos en el texto²⁰.

Figura 2.6. Distribución de los líquidos en un individuo adulto de 70 kilos de peso con ACT de 60%. La dirección del intercambio está señalada por las flechas. El líquido intersticial está en permanente movimiento con el plasma y el LIC. El líquido transcelular se origina desde el LEC pero está modificado por las células que le dan su composición específica.





Pregúntese y respóndase

- ¿Qué es un compartimiento?
- ¿Cómo se distribuye el ACT?
- Compare la distribución del ACT en un adulto normal y en un recién nacido.
- ¿Cuál es el límite físico de los compartimientos hídricos?
- Establezca diferencias entre la membrana celular y la membrana capilar.
- De acuerdo con las características de las membranas, analice la composición de los compartimientos.
- ¿Cuáles son las principales características del compartimiento intracelular?
- ¿Cuáles son las características del compartimiento extracelular?
- ¿Qué semejanzas y qué diferencias encuentra entre los compartimientos extracelulares?
- ¿Qué es el compartimiento transcelular y cómo está compuesto?

2.2 Composición de los compartimientos

Como se ha mencionado, la composición de cada compartimiento está determinada por la naturaleza de la membrana que lo limita. La membrana celular es una estructura dinámica que mantiene el control del compartimiento intracelular, de manera que se conserva en condiciones relativamente estables. Cada tejido muestra sus características morfo-funcionales expresadas en sus contenidos intracelulares: los músculos poseen una gran cantidad de proteínas contráctiles; las neuronas, neurotransmisores; los eritrocitos, hemoglobina, etc. Todas las células tienen algunas características comunes: el principal catión es el potasio y los principales aniones son los fosfatos. El poder osmótico del LIC se equilibra rápidamente con el LEC debido a la permeabilidad al agua por la presencia de acuaporinas. Por cada litro de LIC o de LEC debe haber aproximadamente 300 mOs.

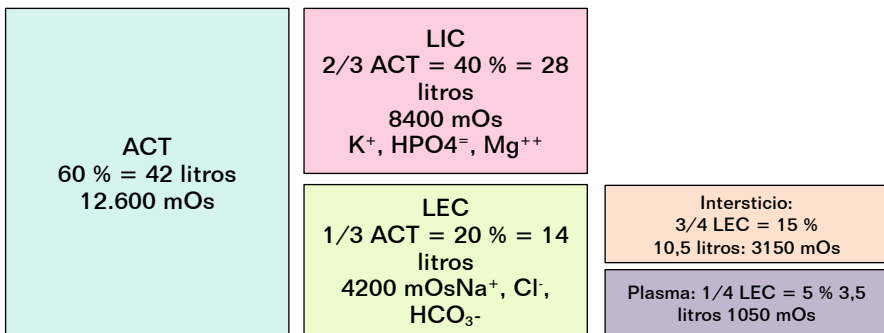
El equilibrio osmótico entre el LIC y el LEC se mantiene por desplazamiento de agua entre los dos compartimientos.

Los solutos que se encuentran por fuera de la célula difieren sustancialmente de los solutos intracelulares. El contenido de proteínas es bajo, el principal catión es el sodio y el principal anión es el cloro. Hay tres veces más bicarbonato que en la célula y el contenido de magnesio así como de fosfatos es muy inferior al de las células. La composición de los dos compartimientos extracelulares, intersticio y plasma, es semejante debido a que la membrana que los limita es la membrana capilar, formada por células endoteliales cuya permeabilidad depende principalmente del tipo de unión entre ellas y la integridad de la membrana basal. En general se afirma que los solutos del plasma se equilibran con el intersticio por difusión principalmente y que únicamente las proteínas plasmáticas permanecen confinadas en el compartimiento vascular.

Entre los dos compartimientos extracelulares, la semejanza de su composición se mantiene principalmente por difusión de solutos que además pueden producir desplazamiento osmótico.

El número de partículas osmóticamente activas por unidad de volumen es el mismo en el LIC y el LEC aunque el principal ion intracelular es el potasio y el extracelular es el sodio, el número de partículas por unidad de volumen tiende a mantenerse equilibrado debido al desplazamiento osmótico (Figura 2.7).

Figura 2.7. Distribución de partículas osmóticamente activas en los compartimientos, en un adulto de 70 kilos con ACT de 60%. Con una osmolaridad cercana a 300 mOs/litro, cada compartimiento muestra el contenido total de partículas osmóticamente activas.



2.3 Compartimientos hídricos en el recién nacido y en el niño

Durante la vida intrauterina y los dos primeros años de vida, el ACT y la distribución hídrica se modifican significativamente con respecto a otras etapas de la vida. La cantidad de agua, como ya se ha anotado, es inversamente proporcional a la edad y a la cantidad de grasa. El tejido adiposo contiene en promedio 10% de agua, en contraste con el músculo con un 75% de agua. Simultáneamente con el crecimiento del niño, el ACT y el LEC disminuyen, a expensas principalmente del decremento del líquido intersticial. La proporción y distribución de agua en las primeras etapas de la vida difieren sustancialmente de las del adulto y presentan continuas modificaciones paralelas al crecimiento y desarrollo del feto y del recién nacido (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Distribución hídrica porcentual aproximada de un adulto y de un recién nacido.

	Recién nacido	Adulto
ACT	80	60
LIC	40	40
LEC	40	20
INTERST	35	15
PLASMA	5	5
TRANSCELAR	1.5	1,5

Para conocer el contenido de agua corporal total del organismo infantil se han empleado múltiples técnicas, ninguna que pueda medir con exactitud la cantidad y distribución del agua corporal. Los valores encontrados constituyen un promedio, resultado de la aplicación de técnicas de estudio a un número de observaciones con un rango de dispersión bastante amplio²¹.

- **El embrión en las primeras fases de desarrollo** tiene un contenido de Agua Corporal Total (ACT) marcadamente alto, cerca del 90% de su peso: el 65% corresponde a LEC y una fracción muy pequeña, el 25%, es LIC. El contenido de grasa del embrión es de aproximadamente el 1% del peso.

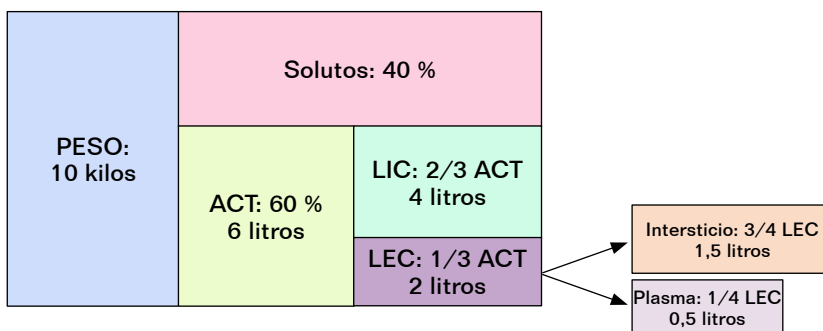
- **Un feto de 1 kilogramo de peso** tiene un poco más del 80% de su peso como agua; el contenido de grasa ha aumentado a 2.5%.
- **El recién nacido a término** (38 a 42 semanas de gestación) muestra un contenido de ACT que fluctúa entre el 75 y el 80% del peso, y el contenido de grasa ha aumentado a valores comprendidos entre el 12 a 15% del peso. El porcentaje de LIC varía entre el 35 a 40% del peso y el LEC es el 40% restante (35% es líquido intersticial y 5% es plasma).
- **El lactante de aproximadamente tres meses** reduce un poco más el ACT que alcanza del 65 al 70% del peso corporal. El contenido de grasa sigue aumentando y puede estar cercano a valores del 30% (fluctúa del 15 al 30%). El LEC disminuye a expensas del líquido intersticial que cae a 35%. A los seis meses, la distribución hídrica puede ser la que aparece en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Distribución hídrica aproximada en un lactante de 6 meses y 7 kilos de peso.

Compartimientos	Volumen (ml)
LIC	2.650
LEC	2.250
ACT (LIC+LEC)	4.900

- **Al alcanzar el primer año de edad**, el ACT se acerca al 60% y la distribución entre los compartimientos corresponde a: LIC 2/3 de ACT y LEC 1/3 ACT (Figura 2.8).

Figura 2.8. Distribución hídrica aproximada en un lactante de 1 año y 10 kilos de peso.



- **Durante la primera infancia y hasta la preadolescencia**, el contenido de ACT está determinado por la proporción de grasa que es muy variable. Al iniciar la secreción de hormonas sexuales, los cambios metabólicos determinan el ACT.

Entre el adulto y el recién nacido se observan a simple vista diferencias marcadas en el contenido porcentual de Agua Corporal Total y su distribución en compartimentos. Mientras más de la mitad del ACT del adulto se distribuye en el interior de la célula (LIC = 2/3 partes) y solo 1/3 parte en el exterior (LEC = 1/3 parte), el recién nacido tiene la mitad del ACT por fuera de la célula; la otra mitad en el interior. A partir de la figura 1.2 se desagregan los componentes de los compartimentos para evidenciar diferencias fundamentales entre un recién nacido y un adulto. (Tabla 2.6).

El agua del LEC es la que se intercambia con el medio. El líquido que ingresa por vía oral como parte de la dieta aumenta el LEC sin necesidad de modificar el LIC. De igual forma, el líquido que sale al exterior (sudor, orina, etc.) se moviliza desde el LEC sin alterar el volumen del LIC.

Lo anterior quiere decir que el niño tiene más agua para perder y su localización facilita que la pérdida sea alta y rápida.

Tabla 2.6. Comparación de los compartimientos entre un recién nacido y un adulto normal.

Peso total del recién nacido (100%)				
20% (1/5)	20% (1/5)	20% (1/5)	20% (1/5)	20% (1/5)
Agua corporal total (80%)				Solutos (20%)
Líquido intracelular (40%)	Líquido extracelular (20%)			
	Intersticio (35%)		Plasma (5%)	
Peso total del adulto (100%)				
20% (1/5)	20% (1/5)	20% (1/5)		20% (1/5)
Agua corporal total (60%)				Solutos (40%)
Líquido intracelular (40%)	Líquido Extracelular (20%)			
	Intersticio (15%)		Plasma (5%)	

Pregúntese y respóndase

- Compare la distribución del ACT en un adulto normal y en un recién nacido.
- ¿Cuáles son las principales diferencias entre un adulto y un niño en la distribución hídrica?
- ¿Cuál es el compartimiento hídrico de mayor proporción en el recién nacido?
- ¿Qué diferencia se observa en la distribución de los líquidos extracelulares del neonato y el adulto?
- ¿Qué compartimientos son los más parecidos proporcionalmente si se compara el adulto con el neonato?

2.4 Métodos para calcular el contenido de ACT y los compartimientos hídricos²²

La mayoría de los compartimientos hídricos puede ser calculada en vivo utilizando el principio de Fick que establece que: *“el volumen (V) de distribución de una sustancia en un compartimiento acuoso del organismo, es igual a la cantidad de sustancia (Q) presente en el compartimiento dividida por su concentración en el plasma (C)”*.

$$V = Q / C$$

El volumen de uno de los compartimientos líquidos puede ser medido añadiendo una cantidad conocida de una sustancia marcadora o “indicador” al compartimiento y midiendo luego su concentración una vez que se haya alcanzado el equilibrio, o sea que se haya distribuido uniformemente.

Por ejemplo, si cinco gramos (5 g) de una sustancia marcadora son añadidos a un recipiente con agua cuyo volumen se desconoce y la concentración de este marcador una vez se ha alcanzado el equilibrio es de 0.1 gramo/dl, el contenido total de agua contenido en el recipiente es:

$$\text{Volumen} = \frac{\text{cantidad total}}{\text{concentración}} = \frac{5 \text{ gramos}}{0.1/100 \text{ ml}} = 5000 \text{ ml}$$

Para que una sustancia pueda ser usada como marcador en un compartimiento específico debe cumplir las siguientes condiciones:

- Quedar localizado en el compartimiento que se va a medir y distribuirse homogéneamente en él
- Ser fisiológicamente inerte y eliminarse fácilmente
- Ser de fácil determinación.

Los compartimientos que pueden medirse por el método de la dilución son:

- **El Volumen de Plasma (VP):** para ello se utilizan sustancias que no atraviesen la membrana capilar ni la membrana celular, es decir, que se distribuyan en el plasma, tales como: albúmina marcada (I^{125}), Azul de Evans (T-1824). Si se conoce el VP y el valor del hematocrito (Hto) se puede determinar el volumen sanguíneo: $VS = VP / 1 - Hto$
- **El volumen del Líquido Extracelular (LEC)**, con sustancias que atraviesen la membrana capilar pero no la membrana celular: Inulina, Manitol, Tiocianato, Tiosulfato, Na marcado
- **El Agua Corporal Total (ACT)**, con sustancias que atraviesen la membrana capilar y la membrana celular: antipirina, óxido de deuterio, óxido de tritio, úrea.
- **El líquido intersticial** se determina indirectamente restando del líquido extracelular el volumen del plasma: **Líquido Intersticial = LEC - VP.**

El Líquido Intracelular (LIC) también se determina indirectamente restando del Agua Corporal Total el LEC: **LIC = ACT - LEC.**

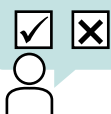


Pregúntese y respóndase

- ¿En qué consiste el método de la dilución para medir el volumen de compartimientos grandes y amorfos?
- ¿Qué establece el principio de Fick?
- ¿Qué características deben tener las sustancias que se usan para determinar el volumen del plasma?
- ¿Cuáles son las sustancias que se usan para medir el volumen del plasma?
- ¿Cuáles son las sustancias que se usan para medir el volumen del LEC y por qué?
- ¿Cómo se determina el volumen del líquido intersticial?
- ¿Cuáles sustancias se utilizan para medir el ACT y por qué?
- ¿Cómo se determina el volumen del LIC?

Es de gran importancia resaltar que aunque se utilizan valores y cifras muy exactas, los seres vivos no se comportan con precisión matemática y dentro de los rangos normales hay una inmensa variabilidad. Todas las cifras que pretenden mostrar valores de una función, no son otra cosa que una aproximación que permite comprender el concepto de "normalidad" para apoyar la "anormalidad" cuando esta se presente.

AUTOEVALUACIONES Y TALLERES



Estos talleres han sido diseñados para apoyar su aprendizaje. Lea cuidadosamente cada pregunta y analice las opciones. Trate de seleccionar la respuesta más acertada. Sustente su respuesta. **Algunas veces puede encontrar más de una opción.** ¡No se quede con dudas! ¡Analice, investigue, pregunte!

1. Tomando el valor normal promedio, la mayor diferencia entre un recién nacido y un adulto con relación a la distribución y proporción del agua, corresponde a:

	Neonato	Adulto	Diferencia
ACT			
LIC			
LEC			
Intersticio			
Plasma			

2. El contenido total de agua (ACT) de un adulto **joven normal** se aproxima a:
- 1/2 del peso corporal
 - 40% del peso corporal
 - 1/4 del peso corporal
 - 3/4 del peso corporal
 - 3/5 del peso corporal
3. De un **adulto normal** se puede afirmar correctamente que:
- El contenido de grasa es inversamente proporcional al de agua
 - El Agua Corporal Total no muestra variaciones significativas de un día a otro
 - El balance iónico debe ser cero
 - La cantidad de agua intracelular es mayor que en el niño
 - Todas las afirmaciones son correctas
4. Proporcionalmente al peso, **el agua como componente del organismo es mayor en:**
- Un niño recién nacido

- Un hombre adulto normal
- Una mujer adulta obesa
- Un hombre joven deportista
- Un hombre anciano

5. Entre un **hombre y una mujer adultos, hay una diferencia importante en el contenido de agua.** Esto se debe primordialmente a:
- El peso del hombre
 - La superficie corporal de la mujer
 - El contenido de grasa de ambos
 - La masa muscular del hombre
 - La distribución de la grasa y del agua en la mujer
6. La distribución y proporción **de agua en el neonato** difiere de la del adulto. ¿Cuál de los siguientes valores expresados en porcentaje es el que **menos** varía?
- Agua Corporal Total
 - Líquido Extracelular
 - Líquido intersticial
 - Plasma
 - B y D son correctas
7. El porcentaje del LIC respecto al peso es **menor** en:
- Un niño recién nacido
 - Una niña de 10 años
 - Una mujer adulta joven
 - Un hombre de 50 años
 - Una mujer anciana

- 8.Cuál de los siguientes valores **NO** corresponde a la distribución de los líquidos para un **adulto normal de 70 kilos** ?
- Agua Corporal Total: 42 litros
 - Líquido intracelular: 35 litros
 - Líquido extracelular: 14 litros
 - Líquido intersticial: 10.5 litros
 - Plasma: 3.5 litros
9. En el ser humano normal, el contenido de agua en el organismo:
- No se modifica durante las diferentes etapas del desarrollo
 - Se aumenta proporcionalmente con la edad
 - Es directamente proporcional al contenido de grasa
 - No presenta variaciones significativas de un día a otro
 - Es menor en los niños en relación con la superficie corporal
10. La determinación experimental del **Agua Corporal Total** (ACT) en un sujeto dio como resultado el 73% del peso corporal. Este valor probablemente corresponde a:
- Un adolescente
 - Una mujer adulta obesa
 - Un niño de dos meses
 - Un anciano
 - Un hombre adulto normal
11. Para determinar de manera experimental el volumen real de los compartimientos se utiliza el método de la dilución. ¿Qué compartimientos y con qué sustancias se pueden medir?
- _____
- _____
12. A partir de la pregunta anterior, ¿cómo se determinan los compartimientos que no se calculan con el método de la dilución?
- _____
- _____
13. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es **CORRECTA**?
- En el adulto, el LEC corresponde a 1/2 LIC
 - En el lactante, el LEC corresponde a 2 LIC
 - La proporción de sangre con respecto al peso se aumenta con la edad
 - El intersticio es el compartimiento con menos cantidad de iones por unidad de volumen
 - El compartimiento que mayor proporción de proteínas muestra es el plasma
14. La relación que normalmente existe entre el volumen del líquido intracelular y el extracelular en un adulto, difiere marcadamente de la de un recién nacido. Expresé dicha relación en **forma de cociente**:
- Adulto LIC / LEC _____
- Recién Nacido LIC/LEC _____
15. Determine su peso corporal en kilogramos. Con base en este dato y utilizando los valores promedio estudiados previamente, **obtenga en litros**:
- Si es hombre**, asuma el contenido de agua corporal total como el 60 % del peso.
- Si es mujer**, asuma el contenido de agua corporal total como el 50 % del peso.
- | | |
|---|--|
| Agua Corporal Total | |
| Volumen del compartimiento intracelular | |
| Volumen del compartimiento extracelular | |
| Líquido intersticial | |
| Volumen Plasmático | |
16. Si en 24 horas usted **pierde un litro de agua por un desequilibrio hídrico**, la composición de los compartimientos se altera. Utilizando los datos de la pre-

gunta No. 15, obtenga los nuevos valores **después de la alteración**.

Agua Corporal Total	
Volumen del compartimiento intracelular	
Volumen del compartimiento extracelular	
Líquido intersticial	
Volumen Plasmático	

17. Los intercambios del organismo **con el medio ambiente** (o medio externo) se realizan de varias formas y a través de diversas vías. Señálelas:

18. El agua se moviliza constantemente entre los distintos compartimientos del organismo. Explique cómo se realiza el intercambio hídrico entre:

a. El compartimiento vascular y el intersticial (los dos extracelulares):

b. El compartimiento intracelular y el extracelular:

19. Compare los mecanismos que determinan el movimiento de agua a través de las membranas que separan los compartimientos del organismo. Busque diferencias y semejanzas.

20. El Agua Corporal Total (ACT) de un adulto es de 50 litros y la relación LIC / LEC es de 1.5. La natremia es de 150 mEq / l, la cloremia de 110 mEq / l y la

kaliemia de 6,5 mEq / l. Con los datos anteriores calcule:

LIC (litros)	
LEC (litros)	
Intersticio (litros)	
Plasma (litros)	
Na total del LEC (mEq)	
Cl total del LEC (mEq)	
K total del LEC (mEq)	

21. Calcule los valores que se piden en el cuadro que aparece a continuación:

	Sujeto 1 Peso 80 Kilos ACT: 65 %		Sujeto2. Peso 50 Kilos ACT: 50 %	
	Normal	Pérdida aguda de dos litros	Normal	Pérdida aguda de dos litros
ACT				
LIC				
LEC				
Intersticio				
Plasma				

22. Para el siguiente ejercicio usted debe utilizar los datos que caracterizan a cada individuo para obtener los valores hídricos normales. Con base en estos resultados calcule los parámetros que se solicitan y la diferencia entre un individuo y el otro. Para los iones, asuma los valores normales promedio:

	Adulto No. 1 Peso: 80 kilos Grasa: 30 % Otros solutos:20%	Adulto No. 2 Peso: 50 kilos ACT: 60 %	Diferencia entre el adulto No. 1 y No. 2
ACT			
LIC			
LEC			
Na en LEC			
Cl en LEC			
K en LEC			
HCO3- en LEC			

Capítulo 3

Balance hídrico y manejo de agua



Objetivos

Al finalizar el capítulo 3, el estudiante estará en capacidad de:

1. Identificar las vías de ingreso y de egreso del agua y de los principales iones del organismo.
2. Reconocer el volumen de agua que se moviliza por cada vía y explicar los mecanismos implicados, teniendo en cuenta las variaciones fisiológicas normales.
3. Explicar el significado de lo que se denomina “pérdidas insensibles” y contrastar la magnitud en un adulto con la de un lactante.
4. Describir la composición iónica de las secreciones que se pierden normalmente por las diferentes vías comparándolas con la composición del plasma.
5. Explicar el término “balance” teniendo en cuenta los ingresos y egresos (ganancias y pérdidas) en condiciones normales.
6. Exponer las causas que alteran el balance hidroelectrolítico, propiciando el balance negativo o el balance positivo.
7. Reconocer las concentraciones iónicas de las secreciones gastrointestinales y piel, predecir lo que ocurre cuando se presentan balances negativos.
8. Analizar el impacto del balance negativo en un lactante al compararlo con el balance negativo de un adulto.

3. Balance hídrico y manejo de agua

La mitad o un poco más de la mitad del peso de un adulto sano corresponde al agua. Su proporción debe ser mantenida dentro de límites normales por medio de mecanismos que ajusten continuamente las ganancias y las pérdidas. Los seres vivos ingresan y egresan agua y solutos permanentemente. En períodos cortos de tiempo los ingresos o ganancias pueden exceder a los egresos o pérdidas, o puede ocurrir lo contrario, pero en períodos mayores de tiempo debe existir un equilibrio entre las ganancias y las pérdidas hídricas, de tal forma que el peso corporal se mantiene relativamente estable. El lapso que se utiliza para comparar las ganancias con las pérdidas, esperando un ajuste, es un día de 24 horas (Figura 3.1).

Figura 3.1. Balance de agua de un adulto normal: los ingresos y los egresos de agua deben ser iguales en un periodo de 24 horas.

Ingreso o ganancia	en mililitros/ 24 horas		Egreso o pérdida	en mililitros/ 24 horas
agua y bebidas	500 - 2.000			heces	100 - 300
agua en alimentos	800 - 1.100		pulmón	400 - 600
agua de oxidación (endógena)	200 - 400		piel	400 - 600
TOTAL	1.500 - 3.500		riñón	600 - 2.000
			TOTAL	1.500 - 3.500

3.1 Ingresos o ganancias de agua

La ganancia total de agua del adulto en 24 horas, en un clima templado, con una actividad física media, *fluctúa entre 1.500 a 3.500 ml / día* y se deriva de dos tipos de fuentes:

3.1.1 La exógena

Está constituida por la suma del contenido de agua de los alimentos y el agua consumida en forma líquida. La cantidad que ingresa por vía exógena es la más importante. Está

determinada en gran medida por factores culturales u medioambientales. El contenido del agua en los alimentos no líquidos puede variar considerablemente, pero una dieta promedio de un adulto aporta cerca de 800 a 1000 ml/día. El volumen de agua consumido como líquido presenta variaciones mayores y están determinadas por factores tales como las condiciones ambientales, el trabajo físico y los hábitos individuales.

El agua que ingresa por vía oral se mezcla con la que compone las secreciones del tubo digestivo para sumar un total aproximado de 9 litros en 24 horas, de los cuales se eliminan en promedio 200 ml haciendo parte de la materia fecal. El resto debe absorberse, la mayor parte en el intestino delgado, casi el 80% (entre el duodeno y el yeyuno el 45%, en el íleo 35%), de manera que al colon llegan cerca de 1500 ml /día de los cuales regresan al torrente circulatorio 1300 ml.

Con esa cantidad de líquido que se intercambia en el tubo digestivo, esta puede ser una vía de pérdida considerable cuando hay alteraciones de la secreción o de la absorción.

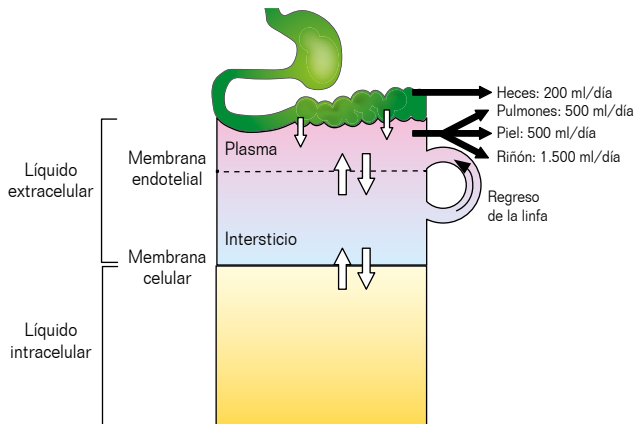
3.1.2 La endógena

Es el agua que se produce durante la oxidación de los alimentos y corresponde a 300 o 400 ml / día: 1 gramo de carbohidratos proporciona 0.6 ml de agua, 1 gramo de proteína proporciona 0.41 mL y 1 gramo de grasa libera 1.07 mL. Por ejemplo, la oxidación de 1 mol glucosa (180 g), genera 6 moles de agua (108 ml).

3.2 Egresos o pérdidas de agua

La pérdida total de agua del adulto en 24 horas, en un clima templado, con una actividad física media, fluctúa entre 1.000 a 3.500 ml/día. Como se puede observar, las ganancias y las pérdidas de agua deben ser iguales en un periodo de tiempo que permita los ajustes por parte de los órganos y sistemas encargados de ello. Ese tiempo es 24 horas. Las pérdidas de agua del organismo se producen por cuatro vías: *la piel, los pulmones, el tubo digestivo y el riñón* (Figura No. 3.2).

Figura 3.2. Intercambios entre los compartimientos y vías de eliminación del agua. Los solutos y el agua se movilizan entre los compartimientos a través de las membranas: **la membrana celular**, semipermeable y selectiva separa los compartimientos intra y extracelular. Los dos extracelulares están separados por la **membrana endotelial** que es menos restrictiva y permite un mayor movimiento de solutos y agua.



Pregúntese y respóndase

- ¿Cuánta agua ingresa al organismo de un adulto en 24 horas?
- ¿Cuáles son las fuentes de agua en el organismo?
- ¿Qué volumen de agua se produce en el organismo por vía endógena?
- ¿Qué cantidad de agua produce la oxidación de 1 gr de carbohidratos, 1 gr de proteínas y 1 gr de grasas?
- ¿Cuánta agua se pierde en 24 horas?
- ¿Cuáles son las vías de pérdida de líquidos en el organismo?
- ¿Por cuál vía de pérdida de agua egresa menos volumen y por cuál más?

3.2.1 Pérdida de agua por la piel

La piel es una vía por la cual se pierde agua de dos formas: pasiva y activa.

La pérdida pasiva de agua por la piel ocurre por desplazamiento desde las capas más profundas y por tanto “más húmedas”, a las capas más superficiales y más secas; también la evaporación de agua desde las mucosas y los tractos hace parte de los egresos pasivos. Esta pérdida no depende esencialmente de la temperatura corporal o de la temperatura ambiental. La pérdida por evaporación juega un papel muy importante en la termorregulación pues la evaporación de 1 ml de agua remueve cerca de 0,58 kcal. Cerca del 25% de la pérdida de calor del cuerpo ocurre por este mecanismo.

La pérdida activa es la que se produce por sudoración; está modificada por el ejercicio, por la temperatura corporal y la ambiental. Cuando la temperatura ambiental no excede los 30 °C y la temperatura corporal es normal, la sudoración ocurre en la áreas de aposición de la piel, o sea en los pliegues. A medida que la temperatura aumenta, se compromete progresivamente la superficie corporal y la cantidad de sudor aumenta pudiendo convertirse en una pérdida considerable.

El sudor se forma por ultrafiltración del plasma y contiene la mayor parte de los iones pero en concentraciones diferentes. Es un líquido hipo-osmolar si se compara con el plasma. Una pérdida de volumen del LEC por sudoración profusa conduce a una deshidratación hiper-osmolar por hipernatremia principalmente. En el sudor también hay otros iones, potasio y cloro.

Cuando el plasma filtrado hacia las glándulas sudoríparas pasa a través de los conductos, el sodio y el cloruro son gradualmente reabsorbidos, primero hacia el intersticio y luego hacia la sangre. Si el volumen filtrado es poco, el sudor se mueve lentamente permitiendo una reabsorción casi completa de los iones y contiene poca cantidad de estos. Si la intensidad de la sudoración aumenta, el tránsito veloz por los conductos deja menos tiempo para la reabsorción y en consecuencia el sudor contiene más iones. Esto puede ocurrir cuando se hace ejercicio.

Como parte de los mecanismos de adaptación que desarrollan las personas entrenadas, existen diferencias en la composición del sudor permitiendo que quienes están entrenados pierdan menos iones durante los periodos de sudoración profusa. Esto parece deberse a una mayor respuesta a la aldosterona (Tabla 3.1).

La evaporación del sudor es la vía más importante para la pérdida de calor durante el ejercicio y depende de la humedad del aire. Si el aire es muy húmedo, la evaporación del sudor es muy lenta y el calor se disipa lentamente. La baja humedad del aire propicia la evaporación del sudor y otros fluidos (como el aire húmedo que se elimina con la espiración y los fluidos que humedecen los tractos).

La percepción subjetiva de la temperatura varía con el grado de humedad. En un medio seco, con humedad relativa de 10% y temperatura de 32.2°C, la evaporación del sudor es tan rápida que casi no se percibe la sudoración. A la misma temperatura, 32.2°C en un medio con humedad relativa alta, de 90%, la evaporación es más lenta, se pierde menos calor, la sensación térmica aumenta y se hace incómoda.

Tabla 3.1: Concentraciones de iones en el sudor de personas entrenadas y no entrenadas.

	Na ⁺ en sudor (mEq/l)	Cl ⁻ en el sudor (mEq/l)	K ⁺ en el sudor (mEq/l)
Hombres no entrenados	90	60	4
Hombres entrenados	35	30	4
Mujeres no entrenadas	105	98	4
Mujeres entrenadas	62	47	4

La pérdida normal de sodio por sudoración en personas expuestas a condiciones ambientales promedio varía de 50 a 90 mEq/litro. El potasio, el calcio y el magnesio del sudor se encuentran en las mismas proporciones que en el plasma.

Las pérdidas de agua por piel se relacionan con la superficie corporal del individuo. En promedio fluctúan entre **400 a 600 mililitros por día**.



Pregúntese y respóndase

- ¿De qué forma se pierde agua por la piel?
- ¿Cómo ocurre la pérdida pasiva de agua por la piel?
- ¿Qué factores inciden en la pérdida activa de agua por la piel?
- ¿Cómo es la composición del sudor?
- En promedio, ¿qué volumen de agua se pierde por la piel durante 24 horas?
- ¿Cómo se modifica el LEC de una persona que esté presentando sudoración profusa?
- ¿Puede usted señalar tres características en el plasma de quien está sudando abundantemente?

3.2.2 Pérdida de agua por los pulmones

El aire que ingresa a los pulmones durante la inspiración es una mezcla de gases con una relación de 4:1 entre el nitrógeno y el oxígeno respectivamente. El aire seco entra a las vías respiratorias y se humidifica de manera que llega a los alvéolos con una proporción alta de agua en forma de vapor. Durante la espiración el aire que sale de los pulmones lleva el agua que ganó en forma de vapor.

La pérdida de agua por la respiración se modifica con la frecuencia respiratoria y con la humedad del aire. No se pierden iones, de manera que la deshidratación producto de pérdidas por pulmón provoca un aumento de la osmolaridad del LEC.

El ejercicio físico y el aumento de temperatura corporal aumentan la frecuencia respiratoria y son las situaciones en las que se observa una pérdida considerable de agua por la respiración. Algunas patologías que se acompañan de taquipnea (aumento de la frecuencia respiratoria) pueden conducir a deshidratación hiperosmolar.

El valor promedio de pérdida de agua de un adulto normal por esta vía fluctúa **entre 400 y 600 mililitros en 24 horas**

Pérdidas insensibles

La suma de los volúmenes de agua que se pierden por piel y pulmones se denomina “*pérdidas insensibles*” y varían muy poco en condiciones normales. Dependen de la superficie corporal y se modifican con los cambios en la temperatura corporal, ambiental, en la frecuencia respiratoria y en el metabolismo celular. En un adulto de 70 kilogramos son aproximadamente 1.000 mililitros / 24 horas (1 litro/día), la mitad por vía respiratoria y la otra mitad por piel.

Para calcular con más precisión las pérdidas insensibles de un adulto normal para un periodo de 24 horas, se tiene en cuenta el peso:

Pérdidas insensibles del adulto = 15 ml / kg de peso corporal

Cuando se calculan las pérdidas insensibles a un adulto cuya temperatura corporal está aumentada, se debe sumar entre 150 a 200 ml de agua/24 horas, por cada grado centígrado que esté aumentada la temperatura corporal por encima del valor normal o de referencia.

El movimiento de los líquidos en los lactantes y los niños difiere sustancialmente del manejo del adulto²³. Cambia con el aumento de peso (Tabla 3.2) y en los recién nacidos las necesidades de líquidos se modifican en periodos muy cortos de tiempo.

Tabla 3.2. Promedio de pérdidas diarias de líquidos en niños.

	ORINA mL	HECES mL	PÉRDIDAS INSENSIBLES (ml)	TOTAL mL
LACTANTES (2-10 kg)	200-500	25-40	75-300	300-800
NIÑOS (10-40 kg)	500-800	40-100	300-600	840-1500

Los niños tienen unas pérdidas insensibles proporcionalmente mayores que los adultos²⁴. En los recién nacidos las pérdidas por piel corresponden a 2/3 y por tracto respiratorio a 1/3; son el componente más variable de los requerimientos de líquidos en el balance hídrico y están determinadas por numerosos factores fisiológicos y ambientales. Con humedad relativa moderada y ambiente térmico neutral, se observa una relación inversa entre el peso corporal y las pérdidas insensibles de agua.

El cálculo para las pérdidas insensibles (PI) de los niños se relaciona con la superficie corporal (SC):

$$\text{Pérdidas insensibles en menores de 10 kg:} \\ \text{PI} = \text{SC} \times 400 / 24 \quad (\text{SC} = \text{Peso} \times 4 + 7 / 100)$$

$$\text{Pérdidas insensibles en mayores de 10 kg:} \\ \text{PI} = \text{SC} \times 600 / 14 \quad (\text{SC} = \text{Peso} \times 4 + 9 / \text{peso} \times 90)$$

Promediando los valores calculados en los niños, el cálculo se podría hacer de una forma aproximada así:

Pérdidas insensibles del niño = 30 ml / kg de peso corporal



Pregúntese y respóndase

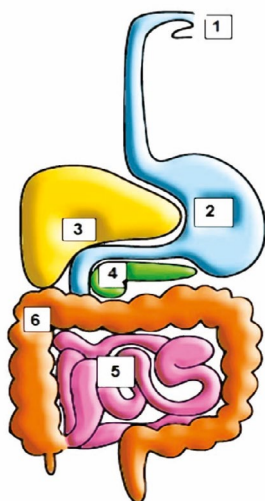
- ¿Cuál es el volumen de agua que pierde en promedio un adulto normal?
- ¿Por qué se pierde agua por la respiración?
- ¿Qué condiciones modifican las pérdidas hídricas por el pulmón?
- ¿Qué son pérdidas insensibles?
- ¿De qué dependen y cómo se modifican las pérdidas insensibles?
- ¿Cómo se calculan las pérdidas insensibles para un adulto?
- ¿Cómo son las pérdidas insensibles de un adulto comparadas con las de un lactante?
- ¿Qué características puede mostrar el plasma de una persona con hiperventilación?

3.2.3 Pérdida de agua por tracto digestivo

El tubo digestivo moviliza una gran cantidad de agua en las dos direcciones: de la luz intestinal hacia el LEC y desde el LEC hacia la luz. El volumen de líquidos que se vierte al tubo digestivo haciendo parte de las secreciones digestivas es considerable; en un adulto normal es de 7 a 9 litros en 24 horas, de los cuales 1 a 1,5 litros provienen de la dieta (Figura 3.3 y Tabla 3.3). Sin embargo, en condiciones normales la pérdida neta de agua y de iones por el tubo digestivo es muy pequeña. La mayor parte se reabsorbe y haciendo parte de las heces solo se eliminan, **en promedio, de 100 a 200 ml de agua / día.**

Del agua que recibe el tubo digestivo de un adulto, que se aproxima a 9 litros en 24 horas, casi la totalidad se reabsorbe durante su paso por los segmentos del tracto gastrointestinal de manera que solamente de 100 a 200 ml se pierden como parte de las materias fecales. Duodeno, yeyuno e íleon absorben aproximadamente el 80% del volumen y casi un 20% (cerca de 1.500 ml/24 horas) se absorbe en el colon.

Figura 3.3. Movimiento de agua en el tubo digestivo: al tubo digestivo del adulto se vierten al día, aproximadamente, 7 litros de secreciones que se suman a los 1,5 litros que ingresan por vía oral. A lo largo de todo el tubo se reabsorbe casi la totalidad del volumen y lo que queda se elimina haciendo parte de las heces, de 100 a 200 ml/día.



Agua que se moviliza en TGI / día	
Ingresos por vía oral	1,5 litros
1-Saliva	1,5 litros
2-Jugo gástrico	1,5 litros
3 -Bilis	1,0 litro
4-Jugo pancreático	1,0 litro
5-Intestino delgado	1.5 litros
6-Intestino grueso	0,5 litro
Total	9.0 Litros

Agua que se absorbe en TGI / día	
Duodeno y yeyuno	3-5 litros
Íleon	2-4 litros
Colon	1-2 litros
Agua eliminada/día	0,2 Litros

El movimiento del agua en el tubo digestivo depende del movimiento de los solutos en una u otra dirección. Es un mecanismo osmótico que se hace por vía transcelular o por vía paracelular (atravesando las uniones entre un enterocito y otro).

Tabla 3.3. Volumen y composición de las secreciones digestivas en un adulto.

Secreción	Flujo (ml/día)	Na + (mEq/l)	Cl - (mEq/l)	HCO ₃ - (mEq /l)	K + (mEq / l)
Saliva	1.500	5 - 25 Depende del flujo	15 - 30 Depende del flujo	Depende del flujo	10 - 20
Gástrico	1.500	20 (pH mas ácido) 80 (pH menos ácido)	(100-150) 100	0	(5-20) 10
Duodenal	1.500	60	100	10	15
Biliar	500	140	100	25	5
Pancreático	500-800	140	40	120	5
Yeyunal	1.000	140	100	20	6
Ileal	600	80	60	75	8
Colónico	100	40 - 140 (aumenta flujo)	15	30	90 35 a 60 (flujo)

La composición iónica de los jugos digestivos difiere considerablemente entre ellos²⁵ (Tabla 3.3) y los desequilibrios hidroelectrolíticos causados por alteraciones que comprometan el tracto gastrointestinal muestran características inherentes a la secreción que esté implicada. El tubo digestivo constituye una vía potencial de pérdida de agua y de iones de la mayor importancia. Trastornos como la diarrea y el vómito, alteraciones en la motilidad de tubo digestivo, pueden traer consecuencias muy graves en el equilibrio y balance hidroelectrolítico. Las alteraciones que comprometen el tracto digestivo alto como pueden ocurrir cuando hay vómito profuso, van a conducir a una deshidratación con pérdida de iones entre los que sobresalen el cloro (jugo gástrico), el potasio (saliva y jugo gástrico) y el hidrogenión (jugo gástrico). Por consiguiente, la deshidratación por vómito puede acompañarse de alcalosis, hipocloremia e hipopotasemia. La diarrea en cambio, produce deshidratación con pérdida abundante de bicarbonato (jugo pancreático e íleon) y potasio (depende del flujo). Los otros iones que también se pierden durante la diarrea lo hacen en concentraciones semejantes a la plasmática.

Pregúntese y respóndase

- ¿Cuánta agua se moviliza normalmente en el tubo digestivo durante 24 horas en un adulto?
- ¿Cuáles son las secreciones que se vierten a la luz del tubo digestivo?
- ¿Qué diferencias encuentra en la concentración iónica entre el plasma y cada secreción digestiva?
- ¿Cuáles son los principales iones que se pierden con el vómito?
- ¿Cuál será la característica del LEC de un individuo que esté presentando vómito?
- ¿Cuáles son los principales iones que se pierden con la diarrea?
- ¿Qué características muestra el LEC de un individuo con diarrea?

3.2.4 Pérdidas de agua por el riñón²⁶

El órgano encargado de mantener el equilibrio hídrico es el riñón. Los egresos de agua por el riñón dependen de los ingresos o ganancias y de las pérdidas por otras vías, de forma tal que si se aumentan los ingresos en la dieta, el riñón aumenta la eliminación para lograr el equilibrio; si aumentan las pérdidas por cualquier vía, el riñón disminuye

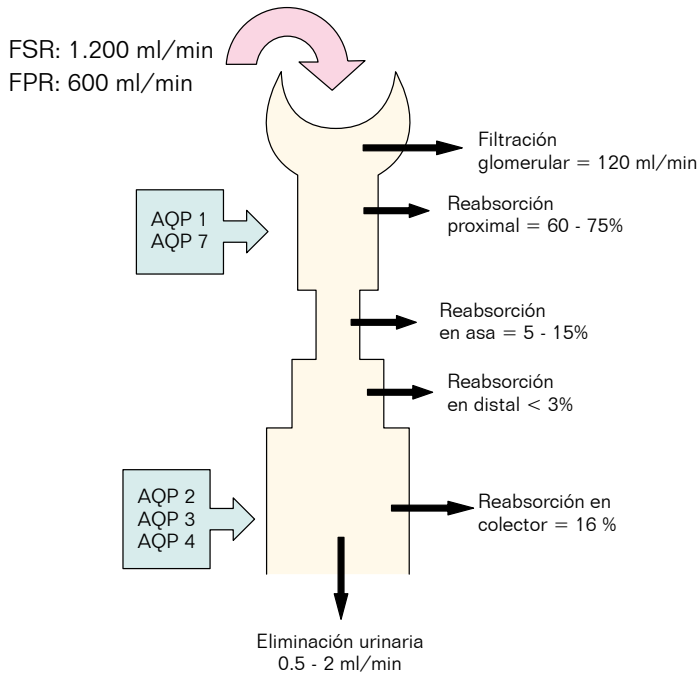
las pérdidas. La eliminación de orina en los adultos varía entre 0.5-2 mililitros / minuto; para efectos prácticos se asume un valor promedio de 1,0 ml / min que corresponde a 1,500 ml / 24 horas, pero hay que recordar que las pérdidas se relacionan con los ingresos y con la eliminación por las otras vías de pérdida.

Las características hemodinámicas del riñón son especiales y le permiten realizar su función de mantenimiento de la homeostasis hidroelectrolítica. El Flujo Sanguíneo Renal (FSR) es uno de los más altos de todo el organismo. Aunque el peso de los dos riñones está apenas cerca de los 300 gramos, el FSR es el 20 a 25 % del gasto cardíaco en reposo, o sea de 1.200 a 1.300 ml / minuto. Los capilares glomerulares originados de las arteriolas aferentes reciben la sangre con una presión considerablemente mayor que la de cualquier otro capilar: en el extremo aferente es de 60 mm Hg y en el eferente de 58 mm Hg. En estas condiciones, el volumen filtrado hacia la cápsula de Bowman, es muy alto. De los 600 a 650 ml / min de plasma que llegan a los riñones (Flujo Plasmático Renal-FPR), se filtra del 15 a 20 % o sea 120 ml/min aproximadamente.

El filtrado inicia el recorrido por los túbulos y en cada segmento se reabsorbe una proporción, que de acuerdo con el segmento puede ser variable. El movimiento de líquido en cualquier porción de los tubos es un proceso osmótico que depende de los gradientes de concentración de los solutos entre las membranas.

Las membranas celulares no son permeables al agua. Para el movimiento de agua a través de la bicapa lipídica debe existir una vía especial constituida por un “canal o poro” de naturaleza proteica. Los canales que permiten el paso de agua se denominan Acuaporinas (AQP) y se han descubierto cerca de 13, los cuales se numeran AQP1, AQP2, AQP3, etc. En la nefrona se han identificado cinco: AQP-1, AQP-2, AQP-3, AQP-4, AQP-7 (Figuras 3.4, 3.5 y Tabla 3.4). En la síntesis de la AQP-2 se requiere la participación de la HAD²⁷.

Figura 3.4. Manejo del agua por el riñón: participación de los distintos segmentos de la nefrona. Localización de las acuaporinas.



En el tubo proximal la reabsorción varía entre el 60 al 75%. Al finalizar el tubo proximal el volumen del filtrado se ha reducido en más de la mitad. En este segmento, el movimiento del agua no depende de los ingresos ni de las secreciones hormonales. Se denomina **reabsorción obligatoria**. Es un evento osmótico que se asocia con la reabsorción de sodio y la permeabilidad de la membrana de las células tubulares, la cual es muy alta para el agua debido a la presencia de acuaporinas, AQP1 en los segmentos S1 y S2 y AQP1 - AQP7 en el segmento S3.

En el asa de Henle, la reabsorción de agua varía entre el 5 al 15%. Las asas de Henle de las nefronas yuxtamedulares, que son asas muy largas, reabsorben el 15% del volumen filtrado. La porción descendente del asa es muy permeable al agua pero la porción ascendente es impermeable. Tampoco depende de hormonas y se puede considerar **obligatoria**. Hay abundantes AQP1

Tabla 3.4. Acuaporinas (AQP) en la nefrona y HAD.

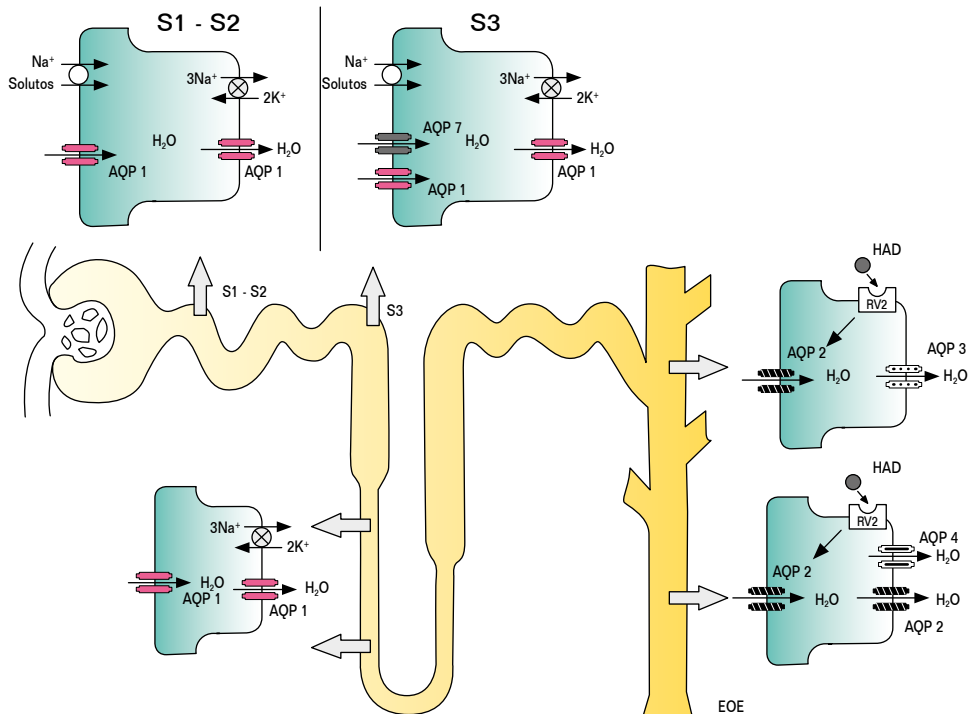
Canal de agua	Localización	Regulada por la ADH
AQP-1 (también llamada CHIP-28)	En muchas células. En tubo contorneado proximal y en la porción descendente del asa.	No
AQP-2	En la membrana luminal de las células principales del tubo colector.	Aumenta la síntesis y estimula la inserción del poro en la membrana.
AQP-3	Membrana basolateral de las células principales del colector.	No
AQP-4	Membrana basolateral de las células principales del colector.	No
AQP-7	En el borde en cepillo del tubo proximal recto.	No

A partir de la nefrona distal (tubo distal, conector y colector), la reabsorción de agua se denomina **reabsorción facultativa**, es decir, en esos tubos se hace el ajuste principalmente por medio de hormonas, entre las cuales la Hormona Antidiurética (HAD) o vasopresina es la más importante.

El tubo distal y el conector son casi impermeables al agua y la HAD no tiene ningún efecto sobre las células. La cantidad que se reabsorbe es mínima y depende principalmente de la reabsorción facultativa de otros solutos tales como el sodio y el cloro (ver Figura 3.5).

El tubo colector es el segmento que ajusta finalmente la reabsorción de agua de acuerdo con las ganancias y las pérdidas por las otras vías. Las células principales del tubo colector cortical tienen una baja permeabilidad pero se aumenta considerablemente por efecto de la Hormona Antidiurética, HAD. El principal estímulo para aumentar la secreción de HAD es el aumento de la osmolaridad plasmática. El núcleo supraóptico responde al aumento de la osmolaridad liberando HAD al plasma. La HAD se distribuye hasta llegar a los tubos colectores. Allí se une con su receptor V2 en la membrana basolateral de las células principales del tubo colector, y por medio del AMPc, activa una proteína-kinasa que finalmente conduce a la formación y la inserción de los canales en la membrana. La AQP-2 también se encuentra en vesículas en el citosol y cuando la HAD actúa, las vesículas se funden con la membrana celular de manera que más canales se suman a los ya presentes en la membrana y una mayor cantidad de agua se desplaza desde la luz tubular hacia el intersticio.

Figura 3.5. Participación de las acuaporinas en la reabsorción renal de agua. El segmento ascendente del asa de Henle, el tubo distal y el colector, no tienen acuaporinas; por lo tanto son casi impermeables al agua.



Al finalizar el recorrido por la nefrona, el líquido que queda en la luz tubular se ha modificado y ha quedado transformado en orina.

El volumen de orina formado en un adulto normal, varía **entre 0,5 a 2,0 ml/min**, lo que corresponde a una eliminación urinaria de 720 a 2.880 ml / 24 horas (0,5ml / min X 1,440 min / 24 horas = 720 ml/24 horas; 2,0 X 1,440 min/24 horas = 2.880 ml / 24 horas).

Las pérdidas de agua por las vías antes descritas tienen las siguientes características:

- Por piel, respiración y heces, las pérdidas no se modifican con los ingresos. En condiciones normales son aproximadamente las mismas.
- Las pérdidas por respiración **no** se acompañan de pérdidas de iones.

- Las pérdidas de agua por piel se acompañan de pérdidas iónicas y son hiposmolares.
- Las pérdidas por tracto gastrointestinal presentan pérdidas de iones que dependen de la secreción o secreciones digestivas comprometidas.
- El ajuste o balance se hace en los riñones. El tubo colector es el segmento que presenta la mayor sensibilidad a las hormonas que determinan la reabsorción facultativa.



Pregúntese y respóndase

- ¿Por qué el riñón es el encargado de mantener el equilibrio hídrico?
- ¿Cuánta agua se pierde por los riñones en 1 minuto?
- ¿Cuál es el volumen de sangre que ingresa a los riñones por minuto?
- ¿Cuánta plasma se filtra en los riñones por minuto?
- ¿Qué son las acuaporinas, cuáles se han identificado en la nefrona y dónde se ubican?
- ¿Cuál acuaporina se relaciona con la hormona antidiurética?
- ¿Qué es reabsorción obligatoria de agua y donde se presenta?
- ¿Qué es reabsorción facultativa de agua y en qué segmento tubular ocurre?
- ¿Cuánta agua se reabsorbe en el tubo proximal, en el asa de Henle y en la nefrona distal?

3.3 Balance

En un organismo vivo, se denomina *“balance”* al resultado de la comparación entre lo que ingresa o se gana y lo que se pierde o egresa, en un periodo fijo de tiempo en el que se han efectuado los ajustes necesarios para mantener una relativa constancia del medio donde ocurren los cambios.

Como ya se había mencionado para el agua, los ingresos o ganancias deben corresponder con las pérdidas o egresos en un periodo de 24 horas, o sea **el balance debe ser cero (0)**, Hay que recordar que el agua es el componente más abundante de los seres vivos y en el caso de un individuo normal representa más de la mitad del peso (más del 50%).

Cualquier alteración en el balance del agua trae consecuencias graves porque modifica los volúmenes de los compartimientos y la relación solutos/solvente, provocando desplazamiento y redistribución que impiden el funcionamiento normal de las células.

Es necesario aclarar que a cualquier soluto que ingrese al organismo se le puede calcular el balance para conocer qué ocurre en el organismo, cómo es su manejo, su eliminación, etc. En el caso de los iones, el balance también debe ser cero.

**El balance del agua en un periodo de 24 horas,
debe ser cero (0) a cualquier edad**

El **balance positivo** se presenta cuando los ingresos son mayores que los egresos o los egresos son menores que los ingresos. O sea que hay una ganancia neta que en el caso del agua se manifiesta por aumento de peso como resultado de una retención de líquidos o **sobrehidratación**; puede ser producida por una exagerada ingestión de líquidos o por una disminución en la eliminación de líquidos.

El **balance negativo** se presenta cuando hay una disminución de los ingresos (p.e. pacientes inconscientes sin reposición hídrica adecuada) o un exceso de los egresos (p.e. diarrea abundante, vómito, sudoración profusa, etc.). Hay pérdida de peso por **deshidratación**. Las alteraciones que llevan a un balance negativo se presentan con mayor frecuencia que las que conducen a un balance el positivo.

Ingresos = Egresos	⇒	Balance cero (0)
Ingresos > Egresos	⇒	Balance positivo (+)
Ingresos < Egresos	⇒	Balance negativo (-)

Los requerimientos mínimos de líquido corresponden al agua necesaria para cubrir todos los egresos y mantener el equilibrio; serán iguales a la formación de orina sumadas a las pérdidas insensibles y a las pérdidas por heces.

Durante las primeras semanas de vida, el balance hídrico es muy frágil porque las condiciones fisiológicas y los mecanismos de ajuste no están desarrollados completamente. La piel como barrera protectora no ha terminado su formación y la función renal está inmadura y las nefronas no han adquirido la capacidad de concentrar la orina. El riñón

del recién nacido concentra la orina solo hasta 600 mOs/l; al año ha aumentado a 1000 mOs/l. Al no poder concentrar la orina, el neonato es más susceptible a la deshidratación.

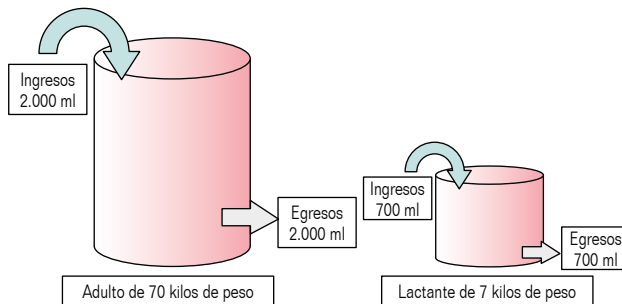
En el periodo post-natal, los requerimientos son variables y hay muchos factores que los pueden modificar fácilmente. Los nacidos pre-término son más susceptibles y sus necesidades son muy altas²⁸. Como ilustración de lo anterior se presenta la Tabla 3.5 que permite comparar los requerimientos durante el primer mes de vida.

Tabla 3.5. Se relaciona el peso al nacer con las pérdidas insensibles y la necesidad de agua, en tres momentos relacionados con el aumento de peso durante el primer mes de vida posnatal.

Peso al nacer (g)	Pérdidas insensibles (ml/kg/día)	Necesidad total de agua (ml/kg/día)		
		Día 1 - 2	Día 3 - 7	Día 8 - 30
750 - 1000	60 - 70	80 - 150	100 -150	120-180
1001 – 1500	30 - 65	60 - 100	80 -150	120-180
>1500	15 - 30	60 - 80	100 -150	120-180

La comparación del balance de un adulto con un niño resulta muy interesante y explica en parte la susceptibilidad del niño a los trastornos hídricos (ver Figura No. 3.6).

Figura 3.6. Balance hídrico comparativo: ingresos y egresos de agua en un adulto y un niño.



Si se toma como ejemplo un adulto normal de 70 kilos, el ingreso y el egreso son aproximadamente 2.000 ml durante 24 horas. Si se acepta que el LEC es el 20% del peso o sea 14.000 ml, se observa que el balance de cero (ingresos = egresos), se hace con 1/7 del LEC, o sea que los 14.000 ml del LEC reciben 2000 ml pero esos mismos 2.000 ml son eliminados, permaneciendo constante el volumen del LEC. Si se considera un niño de 7 kilos de peso (10 veces menos que el adulto) el 30% de ese peso es LEC y el volumen del es 2.100 ml. En promedio un niño con ese peso ingresa o gana y egresa o pierde un volumen cercano a los 700 ml / 24 horas, lo que representa 1/3 del LEC.

**Mientras el adulto hace su balance con 1/7 de su LEC,
el niño lo hace con 1/3 de su LEC**

Los ingresos y egresos de líquidos se manifiestan con cambios en el volumen y composición del LEC. Los cambios en el LIC son lentos y hay gran cantidad de mecanismos que evitan que las modificaciones del LEC alteren la célula.

Varios factores se suman para explicar la gravedad de los desequilibrios hídricos y electrolíticos en los recién nacidos y durante los primeros años de vida:

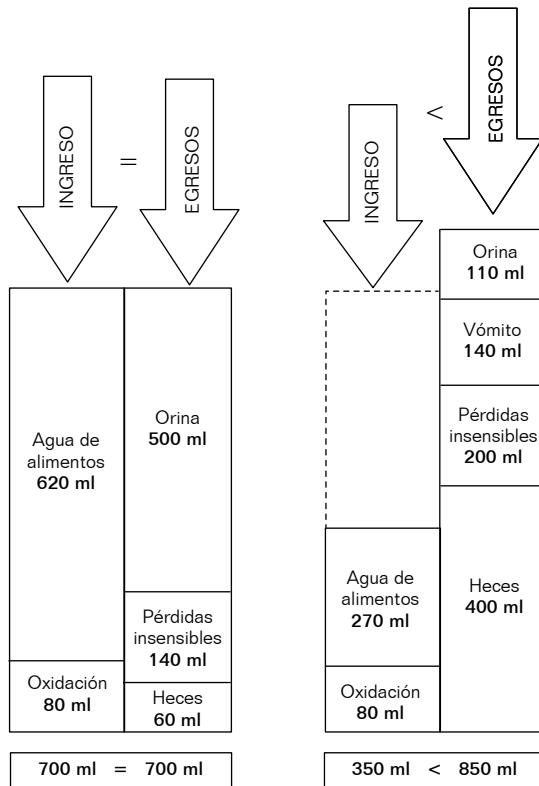
- Proporcionalmente a su peso, el niño tiene más Agua Corporal Total (ACT) que el adulto; por consiguiente, el niño tiene más agua para perder. El promedio de ACT en el adulto es de 60% mientras que en el recién nacido es de 75 a 80% .
- La distribución del agua entre los compartimientos también es muy diferente entre el niño y el adulto. El recién nacido tiene la mitad del ACT en el LEC, mientras que el adulto sólo 1/3 del ACT. El agua que está en el LEC se intercambia más rápida y fácilmente con el agua exógena; lo que ingresa con la dieta se absorbe hacia el LEC y lo que egresa por cualquiera de las vías lo hace a partir del LEC. Por consiguiente el agua del LEC se pierde más fácilmente.
- El balance hídrico lo hace el niño con 1/3 de su LEC, mientras el adulto lo hace con 1/7 de su LEC.

Un ejemplo del impacto en el balance hídrico de un niño de 7 kilos durante una enfermedad diarreica aguda, aparece en la Figura 3.7.

Como se había mencionado anteriormente, el balance hídrico para un lactante de 7 kilos se hace con aproximadamente 700 mililitros. De estos 700 ml el agua endógena

corresponde a 80 ml y el resto a agua de los alimentos. Los egresos se hacen por pulmón y piel (pérdidas insensibles), heces y el ajuste está a cargo del riñón.

Figura 3.7. Balance normal y balance negativo en un niño de 7 kilos: disminuyen los egresos por la pérdida de apetito y aumentan los egresos por el vómito, las heces y las pérdidas insensibles.



Cuando se presenta la Enfermedad Diarreica Aguda (EDA), el balance hidro-electrolítico se altera por varios motivos: los ingresos disminuyen debido a la pérdida de apetito del niño enfermo; los egresos se aumentan por la diarrea y el vómito. Las pérdidas insensibles pueden estar aumentadas por la fiebre que acompaña frecuentemente estos cuadros o por la hiperventilación producida por la acidosis.

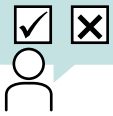
En este caso, el resultado es un balance negativo importante: ingresos: 350 ml; egresos 850 ml. Pérdidas netas: 500 ml en 24 horas que corresponde aproximadamente a 500 gramos o 0,5 kilos de peso.



Pregúntese y respóndase

- ¿Qué es balance hídrico?
- ¿Por qué el balance de agua debe ser cero?
- ¿Cuándo se presenta un balance negativo y cuándo un balance positivo?
- Aproximadamente, ¿qué proporción de agua del LEC moviliza un adulto normal en 24 horas?
- Proporcionalmente al peso ¿el lactante moviliza más o menos agua que un adulto para hacer su balance?
- ¿Cuáles son los factores que determinan que un lactante se deshidrate

AUTOEVALUACIONES Y TALLERES



Estos talleres han sido diseñados para apoyar su aprendizaje. Lea cuidadosamente cada pregunta y analice las opciones. Trate de seleccionar la respuesta más acertada. Sustente su respuesta. **Algunas veces puede encontrar más de una opción.** ¡No se quede con dudas! ¡Analice, investigue, pregunte!

1. **¿Cuánta agua**, teniendo en cuenta los alimentos líquidos, semisólidos y sólidos, cree usted que **ingiere en 24 horas? Haga el cálculo de acuerdo con su consumo de alimentos.**

2. Mencione las condiciones que pueden **modificar la ingestión de agua de un adulto normal.**

3. **¿Cree usted que hay diferencias marcadas entre un niño y un adulto** en cuanto a la ingestión de agua y condiciones que la modifican? Explique.

4. **¿Qué entiende usted cuando se habla de "balance"** de agua o de cualquier otra sustancia que ingresa al organismo? Dé ejemplos.

5. Explique los conceptos: **"balance positivo"** y **"balance negativo"**.

6. **¿Cómo obtiene el organismo el agua que necesita normalmente?**

7. Señale las vías de **egreso o pérdida de agua.**

8. **¿Qué son "pérdidas insensibles"?** En condiciones normales, **¿cuál es el volumen diario de pérdidas insensibles y cómo se puede modificar?**

9. **¿Por cuál vía de las mencionadas se elimina un mayor volumen de agua en condiciones normales? ¿Por cuál vía se elimina un menor volumen de agua normalmente?**

10. Explique el concepto de **"agua endógena"** y la importancia que tiene dentro del balance hídrico normal.

11. Los líquidos que se movilizan en el tubo digestivo y las pérdidas por piel

tienen una composición iónica diferente. Averigüe los volúmenes y las concentraciones iónicas de las siguientes secreciones:

- Sudor
- Saliva
- Jugo gástrico
- Secreción duodenal
- Secreción pancreática
- Secreción biliar
- Secreción del colon

12. Señale las principales diferencias entre el balance hídrico de un adulto y el

de un lactante. Utilice para responder esta pregunta los conceptos que se explican en el documento respectivo.

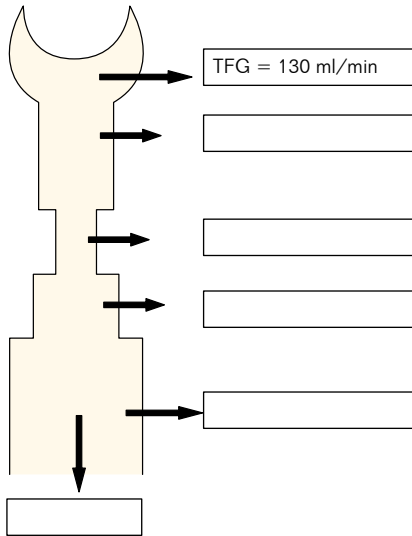
13. De acuerdo con su respuesta anterior, explique por qué un lactante se deshidrata (balance negativo) más fácilmente que un adulto.

PREGUNTAS DE OPCIÓN MÚLTIPLE

A continuación aparecen algunas preguntas con múltiples opciones de respuesta. Lea cuidadosamente el enunciado y todas las alternativas. Seleccione una o más respuestas que considere correctas. Analice las opciones y trate de justificar y sustentar sus respuestas. Si tiene dudas, lea nuevamente el capítulo o consulte la bibliografía complementaria que aparece al final.

1. El volumen de agua que se produce en 24 horas por oxidación de nutrientes:
 - a. Varía marcadamente de un día a otro
 - b. Representa de 1/5 a 1/8 del total de las ganancias de agua en 24 horas
 - c. Aumenta cuando aumentan los ingresos de agua
 - d. Se relaciona con el tipo de alimento que está siendo oxidado
 - e. B y D son correctas
2. ¿Cuál de los siguientes nutrientes es el que produce mayor cantidad de agua al oxidarse exhaustivamente?
 - a. Carbohidratos
 - b. Lipoproteínas
 - c. Vitaminas
 - d. Lípidos
 - e. Proteínas
3. De las ganancias o ingresos de agua se puede afirmar correctamente que:
 - a. Varían de un día a otro
 - b. Dependen de la actividad física
 - c. Se relacionan con los hábitos alimenticios
 - d. Deben ser iguales a las pérdidas en periodos de 24 horas
 - e. Todas son correctas
4. ¿Por cuál de las siguientes vías se pierde normalmente menos agua?
 - a. Pulmón
 - b. Sudor
 - c. Riñón
 - d. Piel
 - e. Tubo digestivo
5. ¿Por cuál de las siguientes vías se pierde normalmente agua sin solutos?
 - a. Pulmón

- b. Sudor
 - c. Riñón
 - d. Piel
 - e. tubo digestivo
6. La denominada "pérdida pasiva" de agua por la piel se caracteriza porque:
- a. Tiene la misma concentración iónica del plasma
 - b. Depende de los ingresos
 - c. Corresponde a la mitad de las pérdidas por piel
 - d. Depende principalmente de la temperatura corporal
 - e. Ninguna es correcta
7. Del sudor se puede afirmar correctamente que:
- a. Su composición depende del flujo
 - b. Es un líquido hipo-osmolar si se compara con el plasma
 - c. Tiene menos Na y menos Cl que el plasma
 - d. Muestra casi la misma concentración de K, Ca y Mg que el plasma
 - e. Todas son correctas
8. Las pérdidas insensibles de un adulto normal corresponden aproximadamente a:
- a. 100 ml/hora
 - b. 15 ml /kilo
 - c. 150 ml/°C
 - d. 600 m /día
 - e. 35 ml/1000 gramos
9. Calcule las pérdidas insensibles (ml/día) de un hombre adulto con un peso de 75 kilos y una temperatura corporal de 39 ° C.
- a. 1000
 - b. 1125
 - c. 1300
 - d. 1450
 - e. 1650
10. En el organismo de un adulto normal, la cantidad de líquidos que se pierde en 24 horas
- a. Está bajo control hormonal
 - b. Es menor cuando disminuyen los ingresos
 - c. Es mayor cuando se aumenta la temperatura corporal
 - d. Está regulada principalmente por el riñón
 - e. Todas las afirmaciones son correctas
11. El volumen de líquidos gastrointestinales que se movilizan en el tubo digestivo en un adulto durante 24 horas corresponde a:
- a. 2000 ml
 - b. 4000 ml
 - c. 5 litros
 - d. 7 litros
 - e. 12 litros
12. ¿Cuál de las siguientes secreciones muestra mayor concentración de bicarbonato?
- a. Saliva
 - b. Jugo gástrico
 - c. Secreción duodenal
 - d. Jugo pancreático
 - e. Bilis
13. ¿Cuál de los siguientes valores **NO** corresponde al ionograma de un individuo que presenta abundante sudoración?
- a. Proteínas: 7 g/dL
 - b. Sodio: 135 mEq/L
 - c. Calcio: 10 mg %
 - d. Cloro: 108 mEq/L
 - e. Potasio: 5 mEq/L
14. Si la filtración glomerular es de 130 ml/min, complete el siguiente esquema, teniendo en cuenta los porcentajes de agua que se reabsorben en cada segmento. Al frente de cada espacio calcule el volumen reabsorbido.



15. Ubique el segmento de la nefrona donde se encuentran los diferentes tipos de acuaporinas
- AQP-1 _____
 - AQP-2 _____
 - AQP-3 _____
 - AQP-4 _____
 - AQP-7 _____
16. ¿Qué proporción de agua se reabsorbe como obligatoria?
- 25 %
 - 35%
 - 50%
 - 65%
 - 80%
17. ¿La síntesis de cuáles acuaporinas depende de la presencia de Hormona Antidiurética o vasopresina?
- AQP-1
 - AQP-2
 - AQP-3
 - AQP-4
 - AQP-7

18. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta?
- Las pérdidas insensibles se modifican cuando cambian los ingresos
 - Cuando se pierde agua por la respiración no se pierden iones
 - La pérdida por sudoración se acompaña de iones pero en menor proporción que el plasma
 - Las pérdidas de agua por el riñón dependen de las pérdidas por otras vías
 - Todas son correctas
19. Un balance negativo por vómito abundante puede acompañarse de:
- Disminución de cloro en el plasma (hipocloremia)
 - Aumento de K en el LEC
 - Disminución de ACT
 - Disminución de hidrogeniones en el plasma
 - A y C son correctas



Capítulo 4

Electrolitos corporales - iones



Objetivos

Al finalizar el capítulo 4, el estudiante estará en capacidad de:

1. Utilizar correctamente las unidades de uso frecuente empleadas para expresar la concentración de los solutos y del solvente en los líquidos orgánicos.
2. Identificar la diferencia de las concentraciones de los principales iones entre el LIC y el LEC y explicar las razones de esto.
3. Reconocer las variaciones normales de la concentración plasmática de los principales iones (ionograma).
4. Puntualizar la importancia de los electrolitos y de los iones en el mantenimiento de las condiciones que caracterizan el compartimiento intracelular y extracelular.
5. Explicar el concepto de neutralidad eléctrica y su importancia en los compartimientos hídricos.
6. Describir el balance de cada ion enfatizando el manejo fisiológico dentro del organismo para mantener la homeostasis.
7. Señalar y analizar el efecto del cambio en la concentración de los iones sobre la distribución del agua en los compartimientos.
8. Resolver ejercicios relacionados con la conversión de unidades y con la dilución o concentración de los compartimientos en situaciones específicas.

Electrolitos corporales - iones

En los capítulos anteriores se ha hecho énfasis en el agua como solvente y principal componente del organismo vivo. El interés ahora recae en los solutos, muy variados en cuanto a su naturaleza, propiedades, estructura química y funciones; pueden ser clasificados de muchas maneras de acuerdo con el criterio que se escoja. En este capítulo se revisan las diferentes formas de expresar la concentración de los solutos, las unidades que se utilizan de acuerdo con lo que se pretende y por su importancia en la distribución hídrica se centra principalmente en los electrolitos, en los iones y su comportamiento cuando están haciendo parte de una solución acuosa.

Cuando están formando parte de una solución, los solutos se pueden expresar de diversas maneras, utilizando unidades que de una u otra forma están relacionadas con el peso (o masa) atómico o con el peso molecular. La mayoría de las sustancias orgánicas se expresan en unidades de peso (gramo o su subunidad), por unidad de volumen (litro o subunidad del litro). Existen otras unidades, mol, osmol, equivalente, etc., que se usan de acuerdo con la característica del soluto y su comportamiento en el solvente²⁹.

Entre las sustancias inorgánicas, **los electrolitos**, compuestos químicos que en solución conducen la corriente eléctrica y se disocian en partículas cargadas denominadas **iones**, merecen particular atención debido a las múltiples y complejas interrelaciones físico-químicas entre ellos y el medio que los rodea.

Es necesario expresar adecuadamente la concentración de los solutos teniendo en cuenta sus características y por eso a continuación se revisan algunos conceptos básicos.

4.1 Peso atómico, peso molecular, mol, milimol

El peso atómico de un elemento es un número arbitrario que se relaciona con el peso de un átomo de oxígeno al cual se le ha atribuido un valor de 16. Por ejemplo, el sodio (Na^+) tiene un peso atómico de 23 y el cloro (Cl^-) de 35,5. Estos valores se encuentran en la tabla periódica. El peso atómico es adimensional, no tiene una unidad específica.

El peso molecular de un compuesto es la suma de sus pesos atómicos. El peso molecular del NaCl es la suma de sus pesos atómicos ($23 + 35,5 = 58,5$)

Una mol de un elemento es igual a su peso atómico *expresado en gramos*. Una mol de NaCl equivale a 58,5 gr de NaCl y contiene 23 gr de Na⁺ y 35,5 gr de Cl⁻. Como la mayor parte de las sustancias presentes en los líquidos corporales muestran concentraciones bajas, se utiliza preferencialmente como unidad de medida **la milimol**, que es la milésima parte de una mol, o sea, el peso atómico o molecular *expresado en miligramos*.

1 mol de X = peso de X en gramos
1 milimol de X = peso de X en miligramos

De esta manera, una mol de NaCl pesa 58 gramos, mientras que una milimol de NaCl pesa 58 miligramos. Una mol de glucosa, C₆H₁₂O₆, pesa 180 gramos y una milimol pesa 180 miligramos.

La concentración de cualquier soluto en los líquidos orgánicos se puede expresar por unidad de volumen o por unidad de peso del solvente. Cuando se dice que la concentración de glucosa en la sangre es de 80 mg/dl, se entiende que por cada decilitro (dl) de plasma (que también son 100 mililitros de plasma) hay 80 miligramos de glucosa. Con frecuencia, se utilizan otras unidades y se debe hacer la conversión. La glucemia se expresa también en milimoles por litro (no por decilitro, sino por litro) de manera que ya no son 80 mg por cada 100 ml, sino 800 mg por 1.000 ml. La concentración de glucosa en el plasma será entonces de 4,44 mMol/litro.

¿Cómo se hizo la conversión de unidades?

- La glucosa pesa 180
- 1 milimol de glucosa son 180 miligramos
- Hay 80 mg por cada 0,1 litro de plasma o sea 800 mg por cada 1 litro de plasma

De manera que:

180 miligramos	=	1 milimol
800 miligramos /litro	=	X ?
X = 4,44 milimoles / litro		

Esto quiere decir que con una glucemia normal de 80 mg/dl o 800 mg/litro, la concentración expresada en milimoles será de 0,444 mMol/dl o 4,4 mMol/litro.

Pregúntese y respóndase

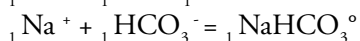
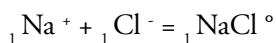
- ¿Qué es un electrolito?
- ¿Qué es un ión y cómo se denomina de acuerdo con la carga eléctrica?
- ¿Qué entiende por peso atómico y por peso molecular?
- ¿Dónde se encuentran los pesos de los elementos y en qué unidades están expresados?
- ¿Qué es una mol y cómo se calcula?
- ¿Cómo se convierten las moles en milimoles y viceversa?
- ¿Cómo se convierten los gramos a moles y viceversa?
- ¿Cuáles son las unidades más utilizadas para el solvente?

4.2 Equivalencia electroquímica - equivalente - miliequivalente - neutralidad eléctrica

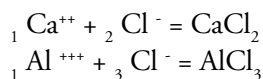
Existen otras unidades diferentes a la mol, cuyo propósito es expresar la relación entre el soluto y el solvente considerando propiedades y comportamiento del soluto cuando está en solución.

El poder de combinación de los elementos para formar compuestos depende del número de cargas cuando están en forma iónica. La unidad que permite expresar el poder de unión entre los elementos o los solutos teniendo en cuenta las **cargas eléctricas, es el *equivalente gramo***. Se entiende que los solutos que no tienen carga, que son neutros, no pueden ser expresados utilizando esta unidad.

El poder de combinación de una partícula cargada depende del *número* de cargas. Un catión como el Na^+ que es monovalente necesita un anión monovalente como el Cl^- o el HCO_3^- para formar un compuesto neutro:



Pero si el ion es bivalente como el calcio y el magnesio (Ca^{++} , Mg^{++}) o trivalente como el aluminio (Al^{+3}), la relación ya no es 1:1 sino 1:2 o 1:3, de manera que una partícula de calcio o de magnesio requiere 2 partículas de un anión monovalente para formar el compuesto neutro y una de aluminio necesitará 3 partículas del anión monovalente:



Queda claro que los iones se combinan entre sí, proporcionalmente a sus valencias químicas más que a sus pesos atómicos. Químicamente el punto de referencia es la carga eléctrica (1+) del peso atómico del hidrógeno (1 g). Esta cantidad de ion es por tanto químicamente equivalente a 1 gramo de hidrógeno. Expresado de otra manera, un equivalente de una sustancia es *el peso atómico o el peso de su fórmula (en gramos) dividido por la valencia iónica*. En la Tabla 4.1 se muestra el peso de una mol comparado con el peso de un equivalente en sustancias mono, bi y trivalentes.

Tabla 4.1. Se compara el peso de una mol con el peso de un equivalente teniendo en cuenta sus valencias. Para una sustancia monovalente, el peso de una mol es igual al de un equivalente. Para una sustancia bivalente, un equivalente pesa la mitad de la mol y para una sustancia trivalente un equivalente pesa la tercera parte de una mol.

ion	Gramos por mol	Gramos por equivalente
Na^{+}	23	23
K^{+}	39	39
Ca^{++}	40	20
Mg^{++}	24.3	12.2
Al^{+++}	27	9
Cl^{-}	35.5	35.5
HCO_3^{-}	61	61
CO_3^{-2}	60	30
SO_4^{-3}	96.1	48.1

O sea que un equivalente de Na pesa lo mismo que una mol, mientras que un equivalente de calcio pesa 20 gramos, la mitad de una mol de calcio, o sea que una mol de calcio tiene 2 equivalentes de calcio.

Si una mol de calcio tiene **dos equivalentes de calcio**, se necesitarán **dos equivalentes de cloro** para formar el compuesto. Quiere decir que una mol de calcio, que son dos equivalentes de calcio, necesita **dos equivalentes de cloro**, que son dos moles de cloro.

**Las sustancias se combinan equivalente a equivalente
y no mol a mol o gramo a gramo**

La ventaja del concepto del equivalente es la simplicidad de una relación 1 a 1. Cuando los cationes y los aniones están presentes en un compuesto o en una solución, siempre se puede estar seguro de que para cada equivalente de carga positiva debe haber un equivalente de carga negativa. Ese es el principio de la “neutralidad eléctrica”.

$$1 \text{ equivalente} = \frac{\text{Peso en gramos}}{\text{valencia}}$$

$$1 \text{ miliequivalente} = \frac{\text{Peso en miligramos}}{\text{valencia}}$$

Este número brinda un índice cuantitativo de las proporciones en que se combinan todos los tipos de iones, debido a que interactúan entre sí *equivalente a equivalente o miliequivalente a miliequivalente y no gramo a gramo*. En el caso de los iones monovalentes, 1 equivalente (peso molecular/valencia) es igual a 1 mol, y 1 miliequivalente es igual a 1 milimol, porque el denominador en la fórmula es 1, o sea que un equivalente es el peso expresado en gramos/1. Los iones que poseen dos cargas eléctricas reaccionan con dos moles de un ion monovalente, ya que requiere los 2 equivalentes presentes en los dos moles del ion monovalente. Los iones polivalentes, debido a lo anterior, tienen un poder de combinación química mayor relacionado con el número de cargas.

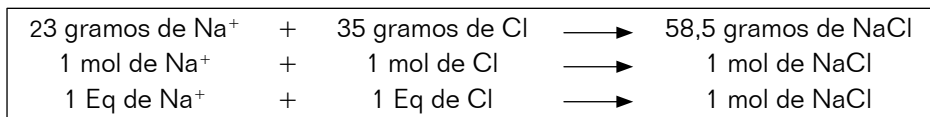
Es evidente que esta unidad cobra importancia y tiene sentido solamente para solutos con carga, para iones. Los solutos neutros como la glucosa NO se expresan en equivalentes o miliequivalentes.

Para interpretar el principio de equivalencia electroquímica que ilustra la forma en la cual interactúan los elementos y sustancias de acuerdo con su carga eléctrica, se puede analizar el siguiente ejemplo:

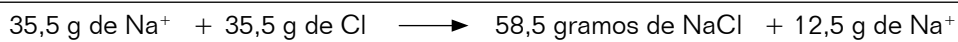
1 mol (1equivalente) de un catión monovalente necesita 1 mol (1 equivalente) de un anión monovalente para formar 1 mol del compuesto

1 mol de Na^+ = 23,0 g de Na^+ = 1 equivalente de Na^+

1 mol de Cl^- = 35,5 g de Cl^- = 1 equivalente de Cl^-



En esta reacción, 1 Eq de Na^+ se combina con 1 Eq de Cl^- . Si se agrega una cantidad igual en gramos de los dos iones, por ejemplo 35,5 g de Na^+ y 35,5 g de Cl^- , se formarían los mismos 58,5 g de NaCl *más un exceso de Na^+* que provoca que se pierda la neutralidad eléctrica.



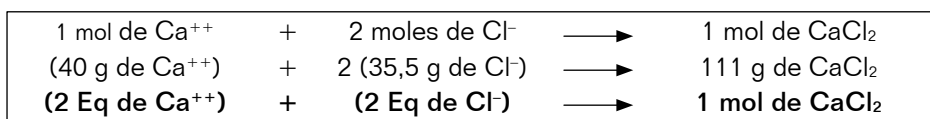
Un ion bivalente que tiene dos cargas eléctricas reaccionará con dos iones monovalentes; por lo tanto, 1 mol de un ion bivalente (que son 2 Eq), precisa 2 moles de ion monovalente (que son dos equivalentes).

1 mol de Ca^{++} = 40 g de Ca^{++}

1 Eq de Ca^{++} = 40 g / 2 = 20 gramos

O sea que una mol de Ca^{++} pesa 40 gramos pero un equivalente de Ca^{++} pesa 20 gramos; lo que significa que una mol de Ca^{++} tiene dos equivalentes de Ca^{++} . Si una mol de Ca^{++} que tiene 2 equivalentes se va a combinar con un anión monovalente, necesitará 2 moles que son dos equivalentes de ese anión.

En consecuencia:



Con frecuencia hay que convertir la concentración de una sustancia o de un ion en una solución, de miligramos por 100 ml (mg%), a miliequivalentes por litro (mEq/litro), para tener una idea sobre el estado de equilibrio eléctrico de dicha solución. Se utiliza entonces la siguiente fórmula:

$$\text{mEq / litro} = \frac{\text{Mg} / 100}{\text{peso atómico}} \times \text{valencia} \times 10$$

4.2.1 Principio de la neutralidad eléctrica

En los líquidos orgánicos como el plasma, el intersticio y el líquido intracelular, la cantidad total de cationes (cargas positivas) debe ser igual a la cantidad total de aniones (cargas negativas) para que se mantenga **el estado de neutralidad eléctrica** de cada compartimiento, lo cual solo se evidencia fácilmente cuando las concentraciones se expresan *en miliequivalentes por litro*. Sin embargo, cuando se expresan en *miligramos por decilitro*, se observa una gran diferencia según los tipos de iones y no se aprecia la interrelación química ni el cumplimiento del principio de la neutralidad eléctrica en cada compartimiento (Tablas 4.2 y 4.3)

El equivalente es una unidad que permite conocer el poder de combinación de un ion y determinar la neutralidad eléctrica de los compartimientos

La expresión “miliequivalente por litro” no es idealmente aplicable a todos los electrolitos en cualquier circunstancia. La fracción ionizada de calcio es la proporción de calcio *no* ligada a las proteínas plasmáticas; las determinaciones habituales incluyen todo el calcio y no quedan expresadas con exactitud en mEq/L. El fósforo sérico está formado por proporciones variables de fosfato monohidrogenado y dihidrogenado (HPO_4^- , H_2PO_4^-) de modo que no puede asignársele valencia única y se debe utilizar el promedio de 1,8. Las proteínas del plasma generalmente se expresan en gramos por 100 ml de plasma (gm%) y aunque están incluidas entre los aniones, su valencia electroquímica se altera por el pH y por otros factores.

Tabla 4.2. Se muestran las concentraciones normales de iones en el plasma, expresadas en mEq/litro (neutralidad eléctrica: aniones = cationes) y en mg / 100 ml (aniones en mayor cantidad que cationes).

Concentraciones normales de los iones plasmáticos		
Cationes	mg / 100 ml	mEq / litro
Sodio	326	142
Potasio	16	4
Calcio	10	5
Magnesio	2,5	2
Total	354,5	153
Aniones		
Cloro	362	104
Bicarbonato	60	27
Fosfato	3,5	2
Sulfato	1,5	1
Ac. orgánicos	15	6
Proteínas	7000	13
Total	7442	153

La composición iónica de los *líquidos intracelulares* difiere sustancialmente de la composición del plasma. La suma total de los aniones y de los cationes intracelulares, expresada en mEq/l, *es mayor que la del plasma*. Pero aun así, la neutralidad eléctrica se mantiene también en el interior de las células porque la cantidad de cationes (mEq/l) es igual a la de aniones (Tabla 4.3). Si la osmolalidad de las células y el líquido extracelular es la misma, es probable que una porción de los iones intracelulares sea osmóticamente inactiva, por ejemplo unidos a proteínas y a otros componentes de la célula.

Tabla 4.3. Concentraciones normales de los iones en el interior de las células musculares. Se evidencia la neutralidad eléctrica.

Concentraciones normales de los iones intracelulares			
Cationes	mEq / l	Aniones	mEq / l
Potasio	155	Fosfatos. orgánicos	110
Magnesio	30	Sulfatos	20
Sodio	10	Bicarbonato	10
		Proteínas	45
		Otros aniones	10
Total	195	Total	195

Pregúntese y respóndase

- ¿Cómo se combinan los elementos para formar compuestos?
- ¿Qué entiende por equivalente gramo?
- ¿Cuál es la finalidad de dicha unidad?
- ¿Cómo se calculan los equivalentes gramo?
- ¿Qué es un miliequivalente?
- ¿Qué tipo de solutos se deben expresar en equivalentes o miliequivalentes?
- ¿Cómo se convierten los gramos a equivalentes y viceversa?
- ¿Qué entiende por neutralidad eléctrica?
- ¿Los compartimientos hídricos muestran neutralidad eléctrica?
- ¿Qué es un ionograma y en qué unidades se expresa el ionograma?

4.3. Presión osmótica - osmoles - miliosmoles- osmolaridad

Las membranas celular y capilar permiten el paso del agua a través de ellas. Los solutos se mueven pasivamente si la membrana es permeable a ellos. Cuando una solución de mayor concentración se halla de un lado de una *membrana semipermeable* (permite el paso de agua pero no de solutos) y otra de menor concentración en el opuesto, se crea una presión osmótica a través de la membrana. El agua pasa entonces del lado de menor concentración al de mayor concentración y diluye la solución hasta que las

concentraciones en ambos lados de la membrana se igualan. El movimiento del agua para igualar las concentraciones se denomina **ósmosis o desplazamiento osmótico**. Se define la **presión osmótica** como el efecto mecánico de atracción que ejercen los solutos en solución al no poder atravesar la membrana que los separa de una solución con menor concentración³⁰.

El efecto osmótico de una sustancia en solución depende sólo de la **cantidad de partículas disueltas**, independientemente de su peso, carga eléctrica, valencia o fórmula química. Esto se debe a que **un mol de cualquier sustancia contiene el mismo número de partículas o moléculas (número de Avogadro: $6,02 \times 10^{23}$ partículas en cada mol), independientemente de su peso**. Si una molécula en solución se disocia en dos o tres partículas (electrolitos), la presión osmótica queda duplicada o triplicada.

La unidad para expresar la presión osmótica se denomina Osmol (Osm) y la subunidad es el miliosmol (mOsm) que corresponde a Osm/1000. Hay que recordar que el osmol es una unidad que se utiliza solamente cuando el soluto está en solución y la unidad de volumen es habitualmente el litro.

Cuando las sustancias no se disocian en partículas más pequeñas, como la glucosa o la úrea, 1 mol es igual a 1 Osm. Esto también se aplica a las sustancias cargadas eléctricamente que no disocian más.

Para la glucosa: 1 mol = 180 g = $6,02 \times 10^{23}$ moléculas = 1 Osm/volumen
 Para el Na⁺: 1 mol = 23 g = $6,02 \times 10^{23}$ partículas = 1 Osm/volumen = 1 Eq

Los iones bivalentes o trivalentes **no** ejercen mayor presión osmótica que los monovalentes a pesar de sus diferentes equivalencias químicas:

Para magnesio (Mg⁺⁺): 1 Mol = 24,5 g = $6,02 \times 10^{23}$ partículas = **1 Osm/l** = 2 Eq
 Para fosfato (PO₄³⁻): 1 Mol = 95 g = $6,02 \times 10^{23}$ partículas = **1 Osm/l** = 3 Eq

Una sustancia que se disocia en dos partículas osmóticamente activas aporta el doble del poder osmótico que una sustancia que no lo hace.

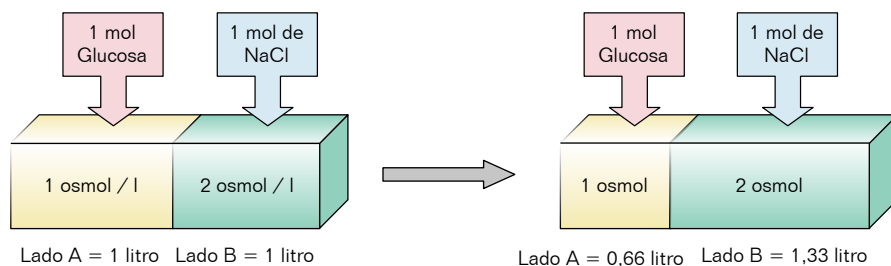
Para el NaCl = 1 mol = 58,5 g = $6,02 \times 10^{23}$ partículas de NaCl que en solución se disocia en Na y Cl y duplica el número de partículas **2 ($6,02 \times 10^{23}$ partículas)**

1 mol = 58,5 gramos = 2 Osm/volumen

Si se prepara una solución con un soluto que no se disocia como la glucosa, la osmolaridad (osmoles /litro) será menor que si se prepara con un soluto que se disocia. Un ejemplo puede ser el siguiente:

En la Figura 4.1 se muestran dos compartimientos separados por una membrana **semipermeable** (se desplaza el agua pero no los solutos); al lado A se le agrega una mol de glucosa (180 gramos) y al lado B se agrega una mol de NaCl (58,5 gramos). O sea que se está añadiendo $6,02 \times 10^{23}$ partículas de cada compuesto a cada lado. Como el NaCl disocia en solución pero la glucosa no, el número de partículas del lado B se duplica y por consiguiente el poder osmótico de B es el doble del de A, lo que produce desplazamiento osmótico (osmosis) desde el lado A hacia el lado B. Cuando la concentración de solutos por unidad de volumen sea igual en los dos compartimientos, cesa el movimiento de agua y eso ocurre cuando el compartimiento B alcance un volumen de 1,33 litros y el compartimiento A reduzca su volumen a 0,66 litros.

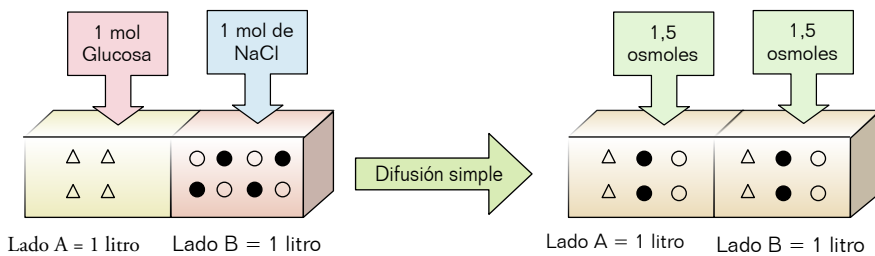
Figura 4.1. La osmolaridad está determinada por el número de partículas independiente del peso o de la carga eléctrica del compuesto. Como el NaCl en solución se disocia, el número de partículas aumenta. En la figura se observa el movimiento del agua desde A hacia B debido a la osmolaridad del NaCl.



El Osmol / volumen es una unidad que permite identificar el poder osmótico de una solución, el cual se relaciona únicamente con el número de partículas, compararla con otras soluciones y determinar el desplazamiento hídrico para igualar concentraciones.

Si la membrana que separa los compartimientos se cambia por una permeable a los solutos (ver Figura 4.2), el comportamiento de las soluciones se modifica y lo que va a ocurrir es movimiento de los solutos (difusión simple) hasta igualar las concentraciones. Este mecanismo no moviliza solvente. Simplemente las moléculas de soluto se desplazan debido al gradiente de concentración o al gradiente eléctrico y en cada compartimiento quedan 1,5 osmoles/litro y además se logró obtener equilibrio eléctrico.

Figura 4.2. Cuando la membrana que separa los compartimientos es permeable a los solutos, estos difunden a través de ella y las concentraciones por unidad de volumen se igualan. A la izquierda se muestra la diferencia de concentración de los solutos debida a la ionización del NaCl generando un desequilibrio osmótico. A la derecha se muestra el resultado del desplazamiento sin cambio de volumen pero con igual concentración de solutos.

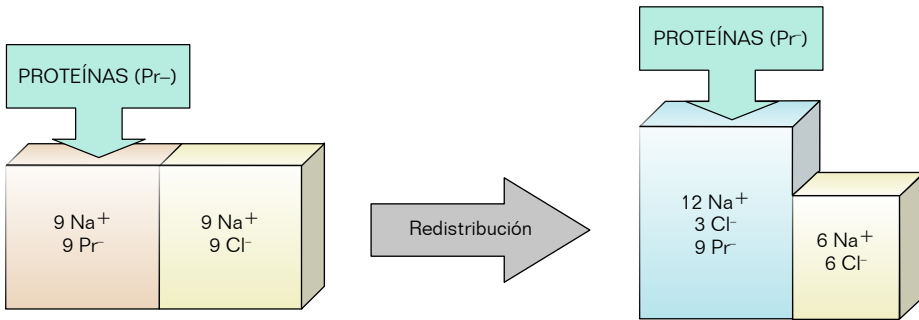


Si a partir del equilibrio que se logró en la Figura 4.2 debido a la permeabilidad de la membrana se adiciona a uno de los compartimientos un anión ***no difusible como son las proteínas del plasma***, se crea un desequilibrio osmótico y eléctrico que produce una redistribución de los iones y del agua, de tal forma que los aniones difusibles como el cloro y el bicarbonato son “empujados” hacia el compartimiento que no tiene proteínas, mientras que los cationes permanecen y son atraídos hacia el compartimiento donde están las proteínas.

Esto se conoce como “Equilibrio de Gibbs-Donann³¹ (Figura 4.3) y tiene características especiales:

- En el compartimiento donde están las proteínas hay menos aniones difusibles y más cationes difusibles.
- La suma de los iones difusibles es mayor en el lado donde están los aniones no difusibles.
- El producto de los iones difusibles es igual en ambos lados de la membrana.

Figura 4.3. Equilibrio de Gibbs-Donnan: la presencia de proteínas (aniones NO difusibles) en uno de los compartimientos produce una redistribución de los iones difusibles acompañada por desplazamiento de agua. Una vez logrado el equilibrio osmótico también se recupera la neutralidad eléctrica de cada compartimiento.



Los líquidos orgánicos (LIC, intersticio y plasma) tienen la misma osmolaridad de 290 a 300 mOs/litro. El LEC cambia su osmolaridad con relativa frecuencia en razón del ingreso de agua y de solutos en proporciones diferentes a las del plasma. Para evitar los desplazamientos hacia la célula cuando la osmolaridad del LEC disminuye o desde la célula al LEC cuando la osmolaridad en este aumenta, el organismo cuenta con sensores que se activan rápidamente para iniciar mecanismos cuyo objetivo es recuperar las condiciones normales.

Aunque los solutos del líquido intracelular y el extracelular son muy diferentes, la cantidad de partículas por unidad de volumen (osmolaridad) está en equilibrio debido al movimiento del agua a través de la membrana celular cuando se crea un gradiente osmótico. El LEC está sujeto a variaciones continuas de acuerdo con los ingresos y los egresos de agua y de solutos. La osmolaridad puede aumentar por disminución del solvente o por aumento de los solutos, lo cual produciría un desplazamiento de agua desde el LIC hacia el LEC si los solutos no atraviesan la membrana.

También puede disminuir por aumento de solvente o por disminución del soluto lo que llevaría a desplazamiento de agua hacia el interior de la célula. Los solutos que no cruzan la membrana son los que generan el gradiente osmótico, principalmente los iones. Cuando los solutos pueden cruzar las membranas, (úrea y etanol), no producen movimiento del agua, se reparten equitativamente; se denominan *osmoles inefectivos*. La osmolaridad del LEC (295 mOs/l) se debe casi en su totalidad al sodio y a los aniones que lo acompañan. El potasio, la glucosa y la úrea hacen una pequeña contribución. Si se

determinan estos componentes en el plasma, es posible calcular su osmolaridad usando una fórmula sencilla:

$$\text{Presión osmótica (mOsm/L)} = 2 \times [\text{Na}] \text{ plasma} + \text{glucemia} / 18 + \text{BUN} / 2.8$$

El mantenimiento de la osmolaridad del LEC requiere un ajuste muy preciso entre el agua y los iones que ingresan y los que egresan. Los mecanismos son múltiples y complejos pero pueden destacarse la participación de sensores hipotalámicos para la osmolaridad (osmorreceptores), la hormona antidiurética, la sensación de sed y el sistema renina-angiotensina-aldosterona. Más adelante se describirán detalladamente y se verá su relación con el mantenimiento del medio interno.

Pregúntese y respóndase

- ¿Cuál es la diferencia entre las sustancias que se disocian y las que no se disocian?
- ¿Qué es un osmol?
- ¿Qué utilidad tiene expresar las concentraciones de los solutos en osmoles/volumen?
- ¿Cómo se calculan los osmoles?
- ¿Cuál es la osmolaridad del plasma?
- ¿Cuál es la osmolaridad del líquido intracelular?
- ¿Cuál es el ión que más aporta a la osmolaridad del LEC?
- ¿Cuál es el ión que más aporta a la osmolaridad del LIC?
- ¿Qué es el equilibrio de Gibbs-Donnan?

Diferencia entre osmolalidad y osmolaridad

Osmolalidad: osmoles (o miliosmoles) por kilogramo de solvente

Osmolaridad: osmoles (o miliosmoles) por litro de solvente

Tomando el plasma como solvente, la osmolalidad sería más confiable porque se expresa por kilogramo del solvente y no por volumen, mientras que la osmolaridad se expresa por volumen pero del plasma el 93% es agua y el otro 7% son solutos, dentro de los que sobresalen las proteínas. Así, las proteínas ocupan un volumen que completa el litro: de 1000 ml de plasma, 70 ml son de proteínas.

4.4 Principales iones de los compartimientos

En los cuadros 4.2 y 4.3 se presenta la composición iónica de los dos principales compartimientos hídricos, LIC y LEC, que difiere sustancialmente debido a la presencia de la membrana celular. Los principales iones intracelulares son *el potasio, los fosfatos y las proteínas*, mientras que en los líquidos extracelulares son *el sodio y el cloro*. La osmolaridad del LIC está determinada esencialmente por el potasio y los fosfatos y la del LEC por el sodio y el cloro.

4.4.1 Sodio

El Na total en el organismo adulto (intracelular más extracelular) es de 90 gramos ó 4.000 mEq. El Na es un ión de predominio extracelular y representa junto con el Cl el 90% de las partículas osmóticamente activas en el LEC. La mitad del Na del organismo (50-55%) está en el tejido óseo y no se intercambia con facilidad. El 45% se halla en el LEC en concentraciones que fluctúan entre 140 a 145 mEq/L. El 5% restante está en el LIC en concentraciones que varían de 5-15mEq/L.

La bomba Na-K mantiene las concentraciones en los compartimientos conservando el gradiente químico del exterior al interior de la célula.

Balance

Ingresos: el Na se ingiere normalmente con los alimentos como sal común (NaCl) y por lo tanto está sujeto a grandes fluctuaciones. Se acepta como promedio de 100-200 mEq/día (2,3 a 5,7 gramos de sodio o 6 a 15 gramos de NaCl).

Egresos: se elimina con el sudor en concentraciones de 45 mEq/L o sea 20 mEq/día cuando la sudoración no es excesiva. Interviene la aldosterona.

En las secreciones gástricas también es eliminado (20-100 mEq/l), en jugo pancreático, bilis e intestino delgado (80-150 mEq/l). La mayor parte de la cantidad secretada es absorbida en el duodeno, acoplada con la absorción de glucosa y otros carbohidratos, también aminoácidos. Por heces solo se eliminan de 10-15 mEq/día, pero el tubo digestivo puede constituirse en vía de pérdida importante durante estados de alteración de su función (vómito, diarrea, etc.).

La mayor pérdida de sodio ocurre en los riñones entre 100-140 mEq/día según la ingesta y depende de mecanismos renales que obedecen a las necesidades del organismo: el Na que llega al glomérulo se filtra, pero en los túbulos proximales, más de las 2/3 partes se reabsorben; el resto se reabsorbe por acción de la aldosterona en respuesta a las necesidades y a la osmolaridad del LEC.

Regulación

La natremia, e indirectamente la volemia, depende de la interacción de diversos factores, pero principalmente de la aldosterona y de la Hormona Antidiurética, que actúan acopladas regulando volumen y osmolaridad. Mecanismos como el sistema renina-angiotensina controlan también dichas variables.

La función de la aldosterona consiste principalmente en retener el sodio dentro del organismo y eliminar el potasio. El movimiento del sodio entre los compartimientos del organismo determina movimientos del agua en el mismo sentido. La aldosterona responderá indirectamente a disminuciones o aumentos del sodio (cambios en la osmolaridad), coordinadamente con la Hormona Antidiurética. Si se modifica el LEC, se modifica la volemia. Por lo tanto la hipo o hipervolemia induce cambios en la liberación de hormonas (ver capítulo 6).

Requerimientos

Los requerimientos equivalen a las pérdidas y para el sodio son de 80-100 mEq/día.

Funciones

- Determina con el cloro, la osmolaridad del LEC. El cloro y el sodio son los principales iones del compartimiento extracelular. Son los responsables del 90% de la osmolaridad de los líquidos intersticial y plasmático. Los cambios en la concentración de sodio determinan cambios en la osmolaridad y por lo tanto modificaciones en las secreciones hormonales que tienen que ver con su control.
- Determina el volumen extracelular e indirectamente contribuye a mantener la presión arterial sistémica. Al manejar la osmolaridad y producir movimientos de los líquidos entre los compartimientos determina el tamaño del compartimiento, o sea, su volumen. El plasma constituye aproximadamente la mitad del volumen sanguíneo y, por consiguiente, cambios en el volumen plasmático producen cambios en la presión del líquido circulante.
- Interviene en el mantenimiento del potencial de reposo, en la despolarización de los tejidos excitables y en la conducción de impulsos. En las membranas celulares existen canales para el sodio de forma que al presentarse un estímulo adecuado se

aumenta la permeabilidad y el sodio ingresa al interior de la célula produciendo “despolarización”, o sea disminuyendo la diferencia de potencial entre el interior y el exterior de la membrana.

- Participa en la absorción intestinal de nutrientes tales como glucosa y aminoácidos unido al cotransportador de la membrana luminal. También participa en la reabsorción renal de bicarbonato, algunos carbohidratos y aminoácidos por un mecanismo similar al intestinal.
- El sodio juega adicionalmente un papel fundamental dentro de los mecanismos de regulación renal del equilibrio ácido-básico pues el organismo asocia la reabsorción del Na filtrado a la secreción de hidrogeniones y a la recuperación de bicarbonato presente en la luz tubular. Esto, mediante el intercambio de iones Na y H en forma activa a nivel de los túbulos renales.

4.4.2 Cloro

Cl total en un adulto: 2.100 mEq o sea 80 gramos. Es el principal anión del compartimiento extracelular. El 87.5% se halla en el líquido extracelular: 95-105 mEq/L. El 12.5% se encuentra en el líquido intracelular pero en concentraciones variables que dependen del tejido.

Balance

Ingresos: La mayor parte del cloro ingerido en la dieta está representado por el NaCl aunque hay pequeñas cantidades de KCl y CaCl₂. Se absorbe en la parte alta del intestino delgado en forma pasiva, secundaria a la absorción de Na.

El aporte diario fluctúa entre 50-150 mEq.

Egresos: la mayor parte del cloro eliminado se pierde por riñón y los mecanismos renales son distintos, tanto proximal como distal. El resto del cloro, de 20-45 mEq/día se pierde por sudor y heces así: 20 mEq/día en el sudor y 3 mEq /L en las heces.

Regulación

Los niveles de cloro en sangre dependen de su relación con varios factores, pero no tiene ningún control hormonal directo; la concentración plasmática de cloro multiplicada por la concentración plasmática del bicarbonato debe ser una constante. Por lo tanto, si la concentración de bicarbonato en plasma aumenta, la cloremia debe disminuir y viceversa. Por ejemplo, si por efecto de un vómito pertinaz se pierde cloro y la cloremia tiende a disminuir, el bicarbonato se debe reabsorber y así mantener la relación entre las cargas negativas o aniones.

En el riñón ocurre el ajuste final en el balance del cloro. La mayor parte del cloro filtrado se reabsorbe en el tubo proximal en forma pasiva acoplada a la reabsorción de sodio; al ingresar el sodio a la célula tubular arrastra agua y se concentra el cloro luminal creando un mayor gradiente químico que permite su difusión. En los túbulos distales el manejo del cloro depende del equilibrio ácido-base. Si se estimula la excreción de hidrogeniones por vía renal, una mayor fracción de Na se reabsorberá intercambiada con los H excretados, disminuyendo la fracción del Cl que se reabsorbía con el Na y ocasionando una pérdida de cloruro por la orina. Por cada H excretado por intercambio con el Na se agrega un ion de bicarbonato al plasma. De nuevo se manifiesta cómo las concentraciones de Cl y de bicarbonato están inversamente relacionadas entre sí.

Requerimientos

Para reponer las pérdidas del ion, los requisitos mínimos deben ser equivalentes. El grado de variabilidad para el cloro es muy amplio y muestra oscilaciones de 50-150 mEq/día.

Funciones

- Es el anión más abundante del LEC y con el Na mantiene la osmolaridad extracelular; indirectamente contribuye a mantener la volemia.
- Del manejo renal del ion y de su relación con las concentraciones plasmáticas del bicarbonato se infiere su importancia como parte de los mecanismos reguladores del pH extracelular.
- Formación de jugo gástrico. Las células parietales de la mucosa gástrica forman HCl, intercambiando el H por el Na y el Cl por HCO_3^- . De esta forma, cuando la secreción de jugo gástrico está muy estimulada el pH del plasma se aumenta ligeramente

4.4.3 Calcio

Calcio total en un adulto: 1.100-1.200 gramos o de 15-18 gramos/kilo. El 99% del calcio del organismo está en el hueso en forma de cristales. El 1% restante se encuentra en los líquidos extracelulares, una parte como calcio ionizado (0.45%) y el resto unido a las proteínas del plasma como fracción no difusible (0.55%). Por tal razón la concentración del calcio queda más adecuadamente expresada en miligramos por decilitro o sea de 9-11 mg% o 2,5 mMol/litro.

Balance

Ingresos: dependen de la dieta del individuo, pero con una dieta adecuada se puede considerar que fluctúan entre 500 a 800 mg/día. El calcio se encuentra principalmente en los productos lácteos y sus derivados.

El calcio se absorbe en la parte superior del intestino delgado, pero su absorción depende de la presencia de muchos factores, de los cuales el más importante es el 1.25 dihidrocolicalciferol, derivado de la vitamina D, cuya función es estimular la síntesis de una proteína en las células de la mucosa intestinal y transportar el calcio hacia el interior del organismo.

Otros factores que contribuyen a la absorción del calcio son: el pH gastrointestinal, la hormona paratiroidea y las condiciones que favorecen la acidificación del medio donde se efectúa la absorción.

Egresos: normalmente el calcio ingerido que no se absorbe en el tracto digestivo se elimina por las heces, lo que corresponde a 300-600 mg/día.

La eliminación renal depende de factores hormonales y de su concentración en el plasma. Del 98 al 99% del calcio filtrado es reabsorbido, el 60% a nivel del túbulo proximal, el resto en asa de Henle y en túbulo distal. En el túbulo distal los procesos de reabsorción son mediados por la paratohormona.

Regulación

Los niveles sanguíneos de calcio son controlados por la acción coordinada de las hormonas. La hormona paratiroidea y la calcitonina.

La hormona paratiroidea actúa sobre el hueso hidrolizando los cristales de calcio, aumentando así la calcemia. A nivel intestinal favorece la absorción del calcio y a nivel renal la reabsorción. Es hipercalcemiente en todos los órganos blancos.

La calcitonina es una hormona hipocalcemiente pues favorece la formación de las sales de calcio a nivel del hueso.

Requerimientos

En los adultos normales, los requerimientos diarios son aproximadamente 500 miligramos. En los niños los requerimientos son muy variables y dependen de los factores de crecimiento. De todas formas son mayores que en los adultos.

Funciones

- En la transmisión nerviosa y en la liberación de neurotransmisores.
- En la unión neuromuscular: para que se libere la acetilcolina que es el mediador de la placa motora, es necesario el calcio que va a favorecer la liberación y degradación de las vesículas.
- En la contracción de los diferentes tipos de músculo.
- El músculo esquelético se contrae gracias a un mecanismo que es activado mediante la liberación del calcio que está almacenado en el retículo sarcoplásmico. Sin embargo, el calcio extracelular modifica la excitabilidad de la membrana de la fibra muscular: si se disminuye (hipocalcemia) el músculo esquelético se hace hiperexcitable y responde a estímulos subumbrales favoreciendo la presentación de la tetania.
- En el músculo cardíaco y en el músculo liso el potencial de acción está directamente relacionado con el calcio extracelular.
- Intervención en los procesos de hemostasia y de coagulación. El calcio se requiere para que las plaquetas se agreguen y se adhieran a las superficies lesionadas. También se requiere para la formación del coágulo.
- En la formación de huesos y dientes. El calcio es el principal componente de las sales en dientes y huesos. Está en permanente recambio con el calcio del plasma. Dependiendo del control hormonal se mantiene la osificación.
- En la activación de complejos enzimáticos y como segundo mensajero de hormonas y neurotransmisores.
 - *La calmodulina*, un receptor intracelular para el calcio, posee una gran cantidad de efectos biológicos:
 - Activa la miosina de cadena liviana, enzima que cataliza la fosforilación de la miosina, lo que a su vez causa contracción del músculo liso; la troponina C tiene similitud estructural con la calmodulina.
 - Regula la fosfodiesterasa, enzima que tiene a su cargo la inactivación del AMP cíclico.
 - Controla la fosfolipasa A que causa la formación de ácido araquidónico a partir de los fosfolípidos de membrana, para la síntesis de prostaglandinas.
 - Actúa en el interior de la célula en los microtúbulos y los elementos contráctiles, interviene en la separación de cromosomas homólogos dentro de los procesos de división celular.

4.4.4 Potasio

Potasio total en un adulto de 70 kilos: 4.000 mEq o sea 160 gramos El 98% del potasio se halla en el líquido intracelular: 150 mEq/L. El 2% restante en el líquido extracelular: 4 a 6 mEq/L. El potasio tiende a difundir desde el interior de la célula hacia el exterior a favor de su gradiente de concentración pero es mantenido en el compartimiento intracelular por un mecanismo activo, en contra de su gradiente de concentración, la bomba Na/K ATP asa.

Balance

Ingresos: el potasio se encuentra ampliamente distribuido en los alimentos de una dieta normal. Está presente en las frutas como naranjas, plátanos y ciruelas, en las carnes, en los productos marinos y en las bebidas cola.

El aporte diario fluctúa entre 50-150mEq.

Egresos: por la orina se excreta el 90% del K ingerido. El resto se elimina por heces y sudor. En las heces se eliminan unos 5 mEq/día y en el sudor aproximadamente 8 mEq/día. Por estas dos vías de pérdida, *la aldosterona* influye en la concentración final del ion.

La excreción mayor de potasio se lleva a cabo en el riñón y juegan un papel importante la caliemia (concentración de potasio en sangre), la tasa de filtración glomerular, el estado ácido-base, los niveles sanguíneos de aldosterona y el potencial eléctrico entre la luz del túbulo y la célula tubular.

Del potasio que se filtra en los glomérulos, la mayor parte se reabsorbe a nivel proximal y *es obligatoria*. En los túbulos distales compite con los hidrogeniones para su excreción, pero su reabsorción depende principalmente de los niveles sanguíneos de aldosterona. Una fracción más pequeña es captada a nivel del túbulo distal gracias a la diferencia de potencial transtubular, por mecanismo pasivo e independiente de la aldosterona.

Regulación

La caliemia de un individuo depende principalmente de su regulación por la aldosterona, mineralocorticoide producido en la capa glomerular de la corteza suprarrenal.

La aldosterona actúa en varios tejidos, pero su mayor papel lo juega en los túbulos distales y colectores renales, en donde la hormona produce la reabsorción del Na filtrado acoplada con la excreción de potasio según los niveles plasmáticos de tales iones. La

aldosterona es más sensible a los cambios en la concentración del potasio sérico que a los cambios en la concentración de Na, pues el rango de variabilidad tolerable en la caliemia es bastante estrecho (3,5 a 6 mEq/L), mientras que para el Na es mucho más variable.

Por otra parte, el movimiento de glucosa entre los compartimientos se acompaña de movimientos de potasio. *Indirectamente la insulina disminuye los niveles sanguíneos de K al permitir el ingreso de glucosa en la mayoría de los tejidos.*

Requerimientos

Los requerimientos mínimos de cualquier elemento o nutriente corresponden a las pérdidas. De esta manera es posible mantener un balance en cero.

La pérdida de potasio en un individuo normal es de 40 a 60 mEq/día.

Funciones

- **Funciones neuro-musculares**

- *Mantenimiento del potencial de membrana:* la diferencia de potencial que se registra entre el interior y el exterior de una célula se denomina potencial de membrana o potencial de reposo (en los tejidos excitables) y se debe a la diferencia de concentración del K entre el LIC y el LEC. En las membranas celulares existe una bomba Na-K que mantiene el potasio en el interior de la célula y el sodio en el exterior. Si la diferencia de concentraciones se modifica, el potencial de membrana también: si se aumenta el potasio extracelular la diferencia de concentraciones disminuye y en los tejidos excitables se modifica con aumento de la excitabilidad o sea que la célula responde a estímulos menores (subumbrales). Si se disminuye el potasio extracelular, la diferencia de potencial aumenta tornándose menos excitable a la célula.
- *Flujo iónico durante el potencial de acción:* cuando una célula es estimulada se aumenta inicialmente la permeabilidad para el sodio, el cual por sus gradientes químicos y eléctricos penetra a la célula originando una disminución en el potencial de reposo. La célula se “despolariza”. Casi inmediatamente se aumenta la permeabilidad para el potasio, el cual se moviliza hacia el exterior de la célula siguiendo su gradiente de concentración y la célula recupera su potencial de reposo. La célula se “repolariza”. A continuación la bomba Na-K devuelve los iones a sus respectivos compartimientos.

- **Equilibrio ácido-base**

El potasio tiene repercusiones en el equilibrio ácido-base y este a su vez influye sobre el manejo de dicho ion. Esto se debe a que los iones H^+ , HCO_3^- , Na^+

K^+ y Cl^- se acoplan para mantener el equilibrio eléctrico y el pH de los líquidos corporales.

- Cuando la concentración de hidrogeniones aumenta en el plasma, ellos se movilizan hacia el interior de la célula y para lograr mantener el equilibrio eléctrico el K se desplaza al LEC aumentando la caliemia. *O sea que la acidosis favorece la hipopotasemia.*
- Cuando la concentración de hidrogeniones disminuye en el plasma ocurre el mecanismo contrario o sea que el potasio ingresa al interior de la célula disminuyendo el del plasma. *Una alcalosis favorece la hipopotasemia.*

Analizado de otra forma, un aumento del K sérico favorece su desplazamiento hacia el interior de la célula, intercambiándose por el hidrogenión que se mueve hacia el líquido extracelular, produciendo una acidosis. La disminución del K sérico moviliza el intracelular y compensatoriamente los iones H ingresan a la célula causando aumento del pH o alcalosis.

El desplazamiento de potasio y de hidrogeniones va acompañado por desplazamiento de Na, Cl y bicarbonato.

- **Metabolismo general**

Por cada gramo de glucógeno sintetizado se requieren 0.3 mEq de potasio. Por cada gramo de proteínas sintetizadas se necesita un aporte de 3 mEq de K.

- **Funciones vasculares**

El potasio tiene efectos variados sobre el aparato cardiovascular pero gran parte de ellos son solo visibles cuando se modifica sustancialmente su concentración en el LEC. Un aumento del K produce vasodilatación arterial, bradicardia y paro cardíaco. La disminución del K produce hipotensión, arritmia y cambios típicos en el EKG.

4.4.5 Fósforo

En un adulto de 70 kilos está cercano a 700 gramos. El 85 % forma parte del tejido óseo, el 14 % está dentro de las células (la mayor parte en forma orgánica) y cerca del 1 % se encuentra en el líquido extracelular (en forma orgánica el 70% e inorgánica el 30%).

La concentración plasmática de fosfato reporta el fósforo inorgánico: 2,5 a 4,5 mg/dl.

Balance

Ingresos: el fósforo de la dieta está asociado con la proteína y el calcio de los alimentos (carne, pescado y alimentos lácteos). El calcio y el fósforo suelen provenir de las mismas fuentes alimenticias.

El aporte diario fluctúa entre 900 a 1200 mg.

Egresos: gran parte de fósforo inorgánico plasmático se filtra libremente en el riñón. Cerca del 80 % se reabsorbe, el 65% en el tubo contorneado proximal, 10% en la porción recta del tubo proximal. La Hormona Paratiroidea (HPT) por medio del contenido intracelular de APMc regula la el transporte activo transepitelial; una elevación en la HPT disminuye de manera notable la reabsorción de fósforo.

Funciones

- En el interior de la célula se encuentra formando compuestos de alta energía como el ATP, como segundo mensajero, el AMPc, como 2,3 DPG. Hace parte de los ácidos nucleicos, fosfoproteínas, enzimas y factores reguladores.
- Del 85 al 90% se encuentra en el sistema óseo formando las sales con el calcio, los cristales de hidroxapatita.
- El fósforo extracelular se intercambia permanentemente con el óseo, actúa como buffer en el plasma pero principalmente en la nefrona distal.

4.4.6 Magnesio

Mg total del organismo: 25 gramos.

Es unión predominante intracelular y su concentración no es igual en todas las células. En el hueso se encuentra un poco más del 50% del magnesio del organismo. La concentración promedio en el LIC es de 26 mEq/L. En el LEC la concentración es de 1.5 a 3 mEq/L. En el plasma, aproximadamente el 30% está unido a las proteínas.

Balance

Ingresos: está ampliamente distribuido en la naturaleza, tanto en plantas como en animales. Es constituyente de la molécula de clorofila.

El aporte diario con una dieta normal fluctúa entre 20 a 40 mEq, cuando las necesidades son de aproximadamente 10 a 15 mEq.

Egresos: los iones de magnesio son excretados fundamentalmente por orina, pero una parte importante se elimina por hígado, vesícula biliar, páncreas y células mucosas de tracto gastrointestinal.

Por la orina se eliminan de 60 a 120 mg; el resto se elimina por materias fecales.

Regulación

Las concentraciones de magnesio están en equilibrio recíproco. Si el nivel en el suero disminuye debido a ingestión deficiente o por aumento de la excreción renal, los valores plasmáticos vuelven a la normalidad rápidamente, puesto que los iones de magnesio son movilizados de sus depósitos en hueso, hígado y músculo.

Requerimientos

Los requerimientos diarios son de 200 a 250 mg.

Funciones

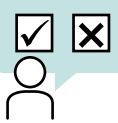
- Cofactor y activador intracelular de los sistemas enzimáticos para la transferencia de radicales fosfato.
- Síntesis de ácidos nucleicos y proteínas.
- Metabolismo general: modula la fosforilación oxidativa y regula los canales iónicos.
- Se requiere para mantener la integridad de numerosas proteínas intracelulares.
- Está comprometido en la conducción nerviosa, contracción muscular y en el funcionamiento de los canales de Ca (ha sido llamado el "bloqueador natural de los canales de calcio).



Pregúntese y respóndase. Para cada ión

- ¿Cuál es la concentración en el plasma?
- ¿Cuál es la cantidad total del ion en el organismo?
- ¿Es predominante intra o extracelular?
- ¿En qué tejido se encuentra principalmente?
- ¿Cuáles son sus funciones?

AUTOEVALUACIONES Y TALLERES



Estos talleres han sido diseñados para apoyar su aprendizaje. Lea cuidadosamente cada pregunta y analice las opciones. Trate de seleccionar la respuesta más acertada. Sustente su respuesta. **Algunas veces puede encontrar más de una opción.** ¡No se quede con dudas! ¡Analice, investigue, pregunte!

1. Defina brevemente y señale la diferencia entre los términos **ion** y **electrolito**:

2. Defina los siguientes términos:
 - a. **Mol** _____
 - b. **Equivalente** _____
 - c. **Osmol** _____

3. La concentración de **los solutos en una solución** puede expresarse de diversas formas. Señale las que recuerde:

4. ¿Cuál es el **electrolito** que existe en mayor proporción en los **líquidos extracelulares**?

5. ¿Considera usted que una mol de calcio **se combina exactamente** con una mol de cloro? Explique.

6. ¿De qué depende el **poder osmótico** de una sustancia cuando está en solución y se ubica en un compartimiento separado de otro por una membrana?

7. ¿Qué relación existe entre el **número de cargas eléctricas** de una partícula (**valencia**) y el **poder osmótico** de ella?

8. ¿Qué diferencia existe entre **osmolalidad** y **osmolaridad**?

9. ¿De qué depende la **osmolaridad** de una solución?

10. Averigüe la **osmolaridad del plasma** e identifique los iones o las sustancias que contribuyen en mayor proporción a dicho valor. De las sustancias orgánicas, ¿cuáles aportan de manera importante a la osmolaridad plasmática?

11. Cuando una solución **se compara con el plasma**, la osmolaridad puede ser **igual, mayor o menor**. De acuerdo con ello, defina los tipos de soluciones.

12. Averigüe la osmolaridad de las siguientes soluciones y exprese el resultado de forma tal que pueda compararlos con la osmolaridad del plasma (mOs/L):

- a. 3000 ml de agua
40 gramos de NaCl
200 gramos de glucosa Respuesta: _____
- b. 2000 ml de agua
1 mol de CaCl_2 Respuesta: _____
- c. 100 ml de agua
190 mg de K
280 mg de Ca
200 mg de Cl Respuesta: _____
- d. 500 ml de agua
Glucosa al 10 %
NaCl al 0.5 % Respuesta: _____

13. Realice las conversiones que aparecen en el siguiente cuadro teniendo en cuenta las unidades que se piden.

Sustancia	Gramos	Equivalentes	Moles	Osmoles/litro
800 mg de glucosa				
10 moles de calcio				
9 equivalentes de Mg^{++}				
20 mOs de HCL				
10 moles de úrea				
500 mEq de $\text{HPO}_4^{=}$				
800 mMol de KOH				
2500 mg de NaHCO_3				

Analice el cuadro que aparece a continuación para responder las siguientes preguntas

Composición iónica de los compartimientos hídricos				
ION	Plasma (mEq/L)	Agua plasmática (mEq/L)*	Liq. Interst. (mEq/L)**	Célula muscular (mEq/L)
CATIONES				
Na +	142,0	152,7	145,1	12,0
K +	4,3	4,6	4,4	150,0
Ca ++	5,0	5,4	2,4	4,0
Mg ++	1,1	1,1	1,1	34,0
TOTAL	152,4	163,9	153,0	200,0

Composición iónica de los compartimientos hídricos				
ION	Plasma (mEq/L)	Agua plasmática (mEq/L)*	Liq. Interst. (mEq/L)**	Célula muscular (mEq/L)
ANIONES				
Cl	104,0	111,9	117,4	4,0
HCO ₃ ⁻	24,5	27,5	27,4	12,0
HPO ₄ ^{=/}	2,0	2,2	2,3	40,0
H ₂ PO ₄ ⁻	16,0	17,0	-	54,0
Proteínas	5,9	6,3	6,2	90,0***
Otros				
TOTAL	152,4	163,9	153,0	
* El agua plasmática representa el 93% del plasma total				
** El factor de Gibbs-Donnan como multiplicador: cationes monovalentes: 0,95 ;cationes divalentes: 0,90; aniones univalentes: 1,05; aniones divalentes: 1,10				
*** Se representan fosfatos inorgánicos como ATP				

14. ¿Qué **característica común** encuentra usted en los cuatro compartimientos? Explique a qué se debe su respuesta.

15. ¿Por qué la concentración de iones en el plasma es menor que la que aparece en el **agua plasmática**?

16. Señale los iones que presentan una **diferencia mayor y significativa** entre el plasma y el líquido intersticial. Explique su respuesta.

17. Identifique:

	LIC	LEC
Los dos cationes más abundantes		
Los dos aniones más abundantes		

18. Teniendo como base el cuadro, explique el concepto de **neutralidad eléctrica** de los compartimientos:

Para responder las siguientes **seis (6)** preguntas analice el esquema que aparece a continuación:

Mg ++	Cl - Cl -
Mg ++	Cl - Cl -
Mg ++	Cl - Cl -

A = 0,5 litro

B = 1 litro

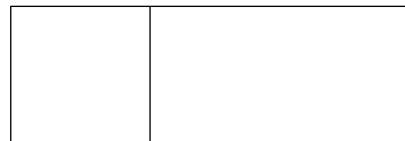
19. Teniendo en cuenta las características de una **membrana semipermeable** y de los solutos en la solución, usted espera que entre los compartimientos ocurra:
- Flujo de solutos desde el lado A hacia el B
 - Movimiento de solvente desde el compartimiento B hacia el A
 - Flujo neto de solutos hacia el lado A
 - Flujo neto de agua hacia el compartimiento B
 - Flujo neto de solvente de cero
20. La concentración de solutos en los compartimientos (**mOs/l**):
- Es igual en el compartimiento A y en el B
 - Es mayor en el compartimiento A no se puede determinar fácilmente
 - Es igual a la cantidad de solutos expresada en mEq/L
 - Es independiente de las características de la membrana
21. Si usted expresa la concentración de los solutos en **mEq/l**, concluirá que:
- Es igual en ambos lados de la membrana
 - Es el doble en el lado A
 - Es el doble en el lado B
 - Es igual a la expresada en mOs/l
 - Es igual a la expresada en mg/l
22. Si el volumen del lado B **se reduce a la mitad** pero la membrana **sigue siendo semipermeable**, se observa:
- Redistribución iónica nuevamente
 - Desplazamiento de agua del lado B al A
 - Redistribución hídrica que reduce el volumen del lado A hasta 0.25 L
 - Movimiento de agua desde el lado A hasta que el lado B alcance 0.66 L
 - Ninguna de las alternativas es correcta

23. Si usted sustituye la membrana por otra, pero **semejante a la membrana capilar**, NO se presentan cambios en la distribución de los solutos.

- Verdadero
- Falso

Explique: _____

24. Tome como ejemplo la primera gráfica y elabore un esquema que muestre cómo se modifica si la membrana se cambia por una permeable y **los solutos se redistribuyen**,



A = 0,5 Litro

B = 1 Litro

25. La composición del líquido intersticial difiere **significativamente** de la del plasma en su concentración de:
- Magnesio y cloro
 - Albúmina y potasio
 - Sulfato y glucosa
 - Calcio y proteínas
 - Sodio y bicarbonato
26. ¿Cuál de los siguientes NO corresponde al valor normal en el plasma de un adulto?
- Proteínas: 75 g/L
 - Ca⁺⁺: 10 mg %
 - K⁺: 15 mEq/L
 - Cl⁻: 95 mEq/L
 - Na⁺: 145 mEq/L
27. Cuando usted administra por vía endovenosa una **solución de glucosa al 10%**, puede observar:
- Hemólisis de los glóbulos rojos
 - Disminución de la osmolalidad del LIC

- c. Inhibición de la Hormona Antidiurética
- d. Aumento moderado de la osmolalidad extracelular
- e. Disminución marcada de la diuresis
28. De la distribución iónica de los compartimientos se puede afirmar **CORRECTAMENTE**:
- El sodio ingresa continuamente al compartimiento intracelular por su gradiente electroquímico
 - La concentración de cloro es mayor en el intersticio que en plasma debido al efecto Gibbs-Donnan
 - El bicarbonato muestra una concentración mayor en el LEC que en el LIC
 - En el compartimiento intracelular, las cargas positivas y negativas son iguales
 - Todas las afirmaciones son correctas
29. ¿Qué cambios espera usted encontrar en un sujeto de 70 kilos quien está presentando desde hace varias horas **vómito de origen gástrico**?
- | | Vol. plasma | natremia | cloremia | pH |
|----|-------------|----------|----------|------|
| a. | 2.400 | 147 | 87 | 7.49 |
| b. | 3.500 | 135 | 98 | 7.45 |
| c. | 3.000 | 130 | 85 | 7.35 |
| d. | 4.000 | 155 | 102 | 7.40 |
| e. | 2.000 | 140 | 106 | 7.50 |
30. ¿Qué factor sería el **menos importante** cuando se calcula la hidratación de este paciente para realizar el tratamiento de reposición de líquidos?
- Sexo
 - Volumen del LEC
 - Vías de pérdida
 - Peso corporal
 - Tiempo de evolución de la alteración
31. De la **distribución iónica de los compartimientos** se puede afirmar correctamente que:
- El sodio ingresa continuamente al compartimiento intracelular por su gradiente electroquímico
 - La concentración de Cl es mayor en el intersticio que en plasma por el efecto de Gibbs-Donnan
 - El anión extracelular cuya concentración le sigue al cloro es el bicarbonato
 - En el compartimiento extracelular, el número de cationes y aniones es igual
 - Todas las afirmaciones son correctas
32. Teniendo en cuenta el equilibrio de Gibbs-Donnan, **es correcto** que:
- La concentración de calcio en el plasma es ligeramente mayor que en el intersticio
 - El cloro y el bicarbonato tienen la misma concentración en plasma y en intersticio
 - La suma de las concentraciones de iones difusibles es mayor en el plasma
 - Si se disminuyen las proteínas del plasma aumentan los aniones en el intersticio
 - Todas las afirmaciones son correctas.



Capítulo 5

Movimiento de agua y electrolitos entre los compartimientos



Objetivos

Al concluir el capítulo 5, el estudiante estará en capacidad de:

1. Identificar la forma como se movilizan los solutos y el solvente entre los compartimientos hídricos del organismo, teniendo en cuenta las características biofísicas de las membranas que los limitan.
2. Diferenciar el tipo de movimiento del solvente y los solutos que se presentan entre los compartimientos intra y extracelular, así como el desplazamiento entre los dos compartimientos extracelulares, intersticio y plasma.
3. Establecer las diferencias entre el desplazamiento osmótico y la filtración, como mecanismos que corresponden al solvente.
4. Clasificar el movimiento de los solutos teniendo en cuenta gradientes, gasto de energía, presencia de transportadores y características de las membranas capilar y celular.
5. Analizar el proceso de filtración, a partir de los valores de las presiones que intervienen en dicho evento, a saber: presión sanguínea, presión coloido-osmótica, presión intersticial y presión oncótica.
6. Indagar sobre el impacto que los cambios en las presiones mencionadas anteriormente, tiene sobre la presión resultante o presión neta de filtración (PNF)
7. Comparar los eventos que ocurren en el lado arterial del capilar con los del lado venoso de la circulación mayor e inferir posibles modificaciones de acuerdo con los cambios en cada una de las presiones.
8. Comparar y diferenciar los procesos de filtración en la circulación sistémica, pulmonar y renal, identificando el impacto de cada una de las presiones de acuerdo con el circuito vascular analizado.
9. Predecir las posibles causas que se relacionen con la fisiopatología del edema y explicar los mecanismos involucrados.

5. Movimiento de agua y electrolitos entre los compartimientos

El ingreso de agua y de solutos a través del tracto gastro-intestinal tiene su primer efecto en la composición del plasma modificando la relación solutos/solvente. Los nutrientes que ingresan al organismo por vía digestiva llegan hasta la célula atravesando *la membrana capilar y la membrana celular*. La remoción de los productos de desecho desde los tejidos involucra también movimientos a través de estas membranas, pero en sentido contrario. El agua se puede mover casi libremente entre los compartimientos pero deben existir mecanismos de control que garanticen la composición del medio interno.

El movimiento del agua y de los solutos entre los compartimientos del organismo depende de la naturaleza de la membrana que los separa y los define, así como de las propiedades biofísicas del agua y de las características de los solutos. Depende también de la magnitud de los gradientes de presión que crea las condiciones para que haya desplazamiento³².

El intercambio entre los **dos compartimientos extracelulares, plasma e intersticio**, sucede continuamente. El límite físico entre ellos es la membrana capilar, el endotelio, cuya permeabilidad es mucho mayor que la membrana celular pues está determinada principalmente por el tipo de unión entre las células endoteliales, por las características de las células endoteliales que varían de un tejido a otro y por las características de la membrana basal del capilar. El movimiento del solvente y del soluto se realiza si las presiones entre los compartimientos lo propician.

Entre el **compartimiento extracelular y el intracelular**, el movimiento de agua es esencialmente un **fenómeno osmótico** y depende de la diferencia que exista en el número de partículas por unidad de volumen entre los dos compartimientos. El movimiento de los solutos obedece a condiciones especiales de la membrana celular y a las necesidades de la célula.

5.1 Movimiento de los solutos

Los solutos atraviesan las membranas utilizando dos mecanismos:

5.1.1 Mecanismos pasivos

Se caracterizan porque se realizan a favor de gradientes (de concentración o eléctricos) y no hay gasto de energía.

- a. Difusión simple: la ley de Fick contempla la difusión de solutos teniendo en cuenta las características de la membrana y las del soluto (ver capítulo 1). Requiere gradiente y permeabilidad de la membrana para el soluto. En el caso de los solutos liposolubles, para el paso a través de la membrana celular solo se necesita gradiente de concentración; en el caso de los solutos hidrosolubles deben existir canales en la membrana de la célula.
- b. Difusión facilitada: los solutos se mueven a favor del gradiente pero su movimiento está propiciado o “facilitado” por una proteína transportadora presente en la membrana de la célula.

5.1.2 Mecanismos activos

Se llevan a cabo en contra de gradiente y por esta razón consumen energía.

- a. Transporte activo primario: representado principalmente por las bombas; la Na/K ATPasa es un ejemplo típico de este mecanismo.
- b. Transporte activo secundario: como lo dice su nombre, es el transporte de un soluto que depende de un transporte activo primario; el movimiento de la glucosa en la membrana luminal de la célula tubular renal o en el enterocito en un prototipo de este transporte.
- c. Endocitosis y exocitosis: es un medio de movilización de solutos de alto peso molecular como son las proteínas y comprende la formación de una vacuola que puede proteger la macromolécula de la digestión enzimática por sustancias proteolíticas presentes en el citoplasma, o una vez dentro de la célula, permitir la fusión con los lisosomas para propiciar la hidrólisis de la macromolécula.

El movimiento de solutos a través de la bicapa lipídica depende del tamaño, carga y solubilidad y la presencia de transportadores que favorecen el movimiento en un sentido o en otro.

Para las sustancias liposolubles se requiere gradiente de concentración y el movimiento es pasivo: **difusión**.

Para algunas sustancias polares como los iones que son hidrosolubles, se requieren canales que permiten la **difusión**: Na, K, Cl y Ca.

Hay sustancias que se movilizan a favor de su gradiente, transportadas por una proteína: **difusión facilitada**.

Los solutos que deben moverse en contra de su gradiente, lo hacen **con gasto de energía** por medio de bombas, o asociados a un soluto cuyo gradiente aporta la energía necesaria para movilizar el otro soluto.

La endocitosis y la exocitosis también hacen parte del movimiento de solutos **con gasto de energía**.

Por el tubo digestivo ingresan solutos y agua en cantidades variables durante todo el día. Mediante el proceso digestivo las partículas de soluto se reducen a un tamaño que permita la absorción, ingresan al plasma y rápidamente difunden al intersticio debido a su gradiente de concentración. La velocidad de difusión de las partículas de soluto dependerá del gradiente de concentración, del tamaño de la partícula y de la permeabilidad del endotelio en cada tejido. En general se puede afirmar que la concentración de la mayoría de los solutos en el plasma es igual a la concentración en el intersticio, exceptuando a las proteínas que están confinadas al plasma; a su vez las proteínas plasmáticas que en su mayoría son sintetizadas en el hígado, determinan la redistribución de los aniones y de los cationes de acuerdo con el equilibrio de Gibbs-Donnan (capítulo 4), de manera que la concentración de aniones en el intersticio es ligeramente mayor que en plasma (cerca de 5% más), mientras que en el plasma la concentración de cationes es un poco mayor que en el intersticio.

Como las proteínas no cruzan la pared capilar o lo hacen con dificultad en un porcentaje mínimo, generan una presión semejante a la presión osmótica en los compartimientos separados por membranas semipermeables. Esta presión se denomina **coloido-osmótica**. Debido a que en el líquido intersticial hay tan pocas proteínas que para efectos prácticos no se tienen en cuenta, la presión coloido-osmótica del plasma produce desplazamiento de agua desde el intersticio hacia el vaso sanguíneo. Esa fuerza de atracción, que en el plasma también se denomina **presión oncótica**, es muy importante para mantener el volumen plasmático circulante. De las proteínas plasmáticas, la albúmina determina casi el 80% de la presión oncótica. La disminución de las proteínas del plasma (hipoproteïnemia) conduce al paso de agua desde el espacio vascular hacia el intersticio.

La permeabilidad de los capilares varía de un tejido a otro y esto determina que haya diferencias en los intersticios para algunos solutos. Hay capilares muy permeables como los del hígado, el bazo y la medula ósea que permiten el paso de células y de proteínas, pero también hay capilares muy restrictivos, como ocurre en el sistema nervioso (barrera hemato-encefálica) y en los testículos (barrera hemato-testicular).

La concentración de solutos en el LEC cambia frecuentemente debido al ingreso y egreso de solutos, y al ingreso y egreso de agua. Estos cambios de osmolaridad en el LEC producirían movimiento de agua hacia o desde el LIC a menos que existan mecanismos que lo controlen.

Entre los dos compartimientos extracelulares, el movimiento de la mayoría de los solutos puede hacerse por difusión simple porque la membrana capilar lo permite.

Entre el compartimiento extracelular y el intracelular, el movimiento de los solutos está sujeto a la presencia de transportadores, bombas, canales, influencias hormonales y necesidad de las células



Pregúntese y respóndase

- De acuerdo con la permeabilidad del endotelio, ¿cómo se mueven los solutos entre el intersticio y el plasma?
- ¿Cómo se mueven los solutos entre el LEC y el LIC?
- ¿Cuáles son los movimientos pasivos de los solutos?
- ¿Cuál es la diferencia entre difusión simple y difusión facilitada?
- ¿Cuáles son las características del transporte activo de solutos?
- ¿Qué es presión coloido-osmótica?
- ¿Qué importancia tiene la presión oncótica en la distribución de los líquidos?
- ¿Por qué la exocitosis se puede considerar un mecanismo activo de movimiento de solutos?

5.2 Movimiento del solvente

En los seres vivos multicelulares, el agua se moviliza a través de los compartimientos de dos formas: la ósmosis y la filtración.

5.2.1 Ósmosis o desplazamiento osmótico

Como ya se ha mencionado en otros capítulos, el organismo regula la concentración de solutos por unidad de volumen (número de partículas/volumen de agua) manteniendo la osmolaridad muy semejante entre los compartimientos para evitar el movimiento innecesario de cantidades importantes de agua.

El **desplazamiento osmótico** ocurre como resultado de la diferencia de concentración de solutos entre dos compartimientos limitados por una **membrana semipermeable**. Esto se presentaría principalmente entre el LEC y el LIC, pero las respuestas reguladoras rápidas evitan una deshidratación o sobrehidratación de las células.

Separando el intersticio del plasma se encuentra la membrana capilar que en la casi totalidad de los tejidos permite el movimiento por difusión de la mayor parte de los solutos, exceptuando las proteínas que son los únicos solutos que actúan como osmoles efectivos entre los compartimientos extracelulares.

El agua se absorbe rápidamente en el tracto digestivo, pasa al plasma y se distribuye hacia el intersticio, repartiéndose equitativamente entre los dos compartimientos extracelulares.



Pregúntese y respóndase

- ¿Cuál es el principal mecanismo para mover el agua entre el LIC y el LEC?
- ¿Por qué la concentración de solutos se iguala rápidamente entre el plasma y el intersticio?
- ¿Cuál es el compartimiento que cambia su osmolaridad con más frecuencia?
- ¿Por qué las modificaciones de la osmolaridad deben controlarse rápidamente?
- ¿Cuáles son los principales solutos responsables de la osmolaridad extracelular y del volumen del LEC?

5.2.2 Filtración³³

Este mecanismo de movimiento de líquidos se presenta en el territorio capilar entre el plasma y el intersticio como resultado de un juego de presiones y fuerzas que determinan la dirección del flujo y que se denominan fuerzas de Starling.

Las presiones (fuerza / área) que intervienen en la filtración son:

- a. **Intravasculares:**
 - presión sanguínea
 - presión oncótica
- b. **Extravasculares o intersticiales:**
 - presión hidrostática intersticial
 - presión coloido-osmótica intersticial

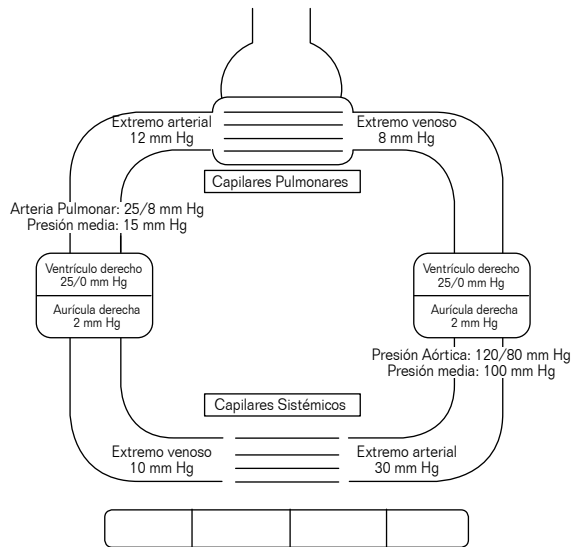
5.2.2.1 Presión sanguínea

Un líquido en reposo contenido en un recipiente ejerce una presión sobre el fondo y las paredes del recipiente por efecto de la fuerza de gravedad. Esa presión se denomina “*presión hidrostática*”. La presión hidrostática en cualquier punto del recipiente es función de la altura de la columna de líquido porque se relaciona con el peso. **A mayor altura de la columna, mayor presión hidrostática.**

Para poner un líquido en movimiento, es decir, para que haya flujo, debe existir un gradiente de presión ($DP = P1 - P2$) entre un punto proximal y uno distal que determina la dirección del flujo. En un líquido en movimiento, la presión va disminuyendo con la dirección del flujo.

La sangre ejerce una presión sobre las paredes del recipiente que la contiene, *presión sanguínea*. La contracción del ventrículo izquierdo genera una fuerza que permite que la sangre circule por el árbol vascular y que llegue hasta los capilares donde se presenta la filtración. En el ventrículo izquierdo, la presión sanguínea fluctúa entre 120 y 0 mm de Hg. En la aorta, la presión sanguínea es de 120 /80 mm de Hg con una media aritmética de 100 mm Hg. A medida que corre por el segmento vascular arterial, la presión va disminuyendo. Cuando alcanza el extremo arterial del capilar sistémico, la presión sanguínea ha descendido a 30 mm Hg. En su paso por el capilar, la presión sigue cayendo y en el extremo venoso se encuentra en 10 mm Hg (Figura 5.1).

Figura 5.1. Esquema de la circulación mayor y menor, mostrando los valores de la presión sanguínea en los diferentes segmentos del sistema cardiovascular. La presión sanguínea va disminuyendo y cuando la sangre llega a los capilares sistémicos, ha caído a 30 mm de Hg en el extremo arterial. Al llegar al extremo venoso, la presión sanguínea llega a 10 mm de Hg, lo que muestra que el DP (P1-P2) es de 20 mm Hg.



La presión sanguínea favorece la salida del plasma libre de proteínas hacia el intersticio y en el extremo arterial es la fuerza dominante que filtra líquido hacia el intersticio. En el extremo venoso, la presión sanguínea ha disminuido lo suficiente para que el líquido que se movió hacia el intersticio debido al aumento de la presión oncótica regrese casi todo al capilar, dejando un pequeño volumen en el intersticio.

5.2.2.2 Presión oncótica

Es la fuerza de atracción que ejercen las proteínas plasmáticas para mantener el agua en el compartimiento vascular debido a que ellas no atraviesan la membrana capilar. Corresponde a la presión “osmótica” ejercida por las proteínas cuando las membranas no son permeables a ellas. Se opone a la presión sanguínea y ayuda a mantener el volumen plasmático. Un aumento de proteínas en el plasma (hiperproteinemia) aumenta la fuerza de atracción (presión oncótica) hacia el vaso sanguíneo; una disminución de las proteínas del plasma (hipoproteinemia) disminuye la fuerza de atracción hacia el vaso sanguíneo y propicia el movimiento de agua hacia el intersticio. El valor promedio de la presión oncótica con una proteinemia normal fluctúa entre 25 a 28 mm Hg. La presión

oncótica varía a lo largo del paso de la sangre por el capilar: en el extremo arterial, el valor está cercano a 28 mm Hg; a medida que el plasma se filtra hacia el intersticio y las proteínas permanecen en el interior del capilar, la presión oncótica va aumentando hasta llegar a la mitad del capilar, más o menos. A medida que la sangre se acerca al extremo venoso, el flujo se invierte y el líquido se devuelve al capilar. El poco líquido que queda en el intersticio forma la linfa que drena y se devuelve al torrente circulatorio.

5.2.2.3 Presión hidrostática intersticial

Es la presión del líquido intersticial que a diferencia de la presión sanguínea es negativa o sub-atmosférica; o sea que **no** “empuja” el líquido intersticial hacia el plasma, sino que atrae el plasma hacia el intersticio. Se opone a la presión oncótica y se suma a la presión sanguínea y a la coloido-osmótica intersticial. Aunque varía de un tejido a otro, el valor promedio es de -3 mm Hg. El líquido del intersticio es el resultado del que se filtró y del que se devolvió al capilar. Como no se devuelve todo el que se filtró, el resto se drena por los linfáticos. Los linfáticos se originan en el intersticio en forma de pequeños canales constituidos por células endoteliales con uniones laxas entre ellas que funcionan como válvulas unidireccionales. Cualquier alteración en el intercambio de líquidos entre el capilar y el intersticio altera esta presión.

5.2.2.4 Presión coloido-osmótica intersticial

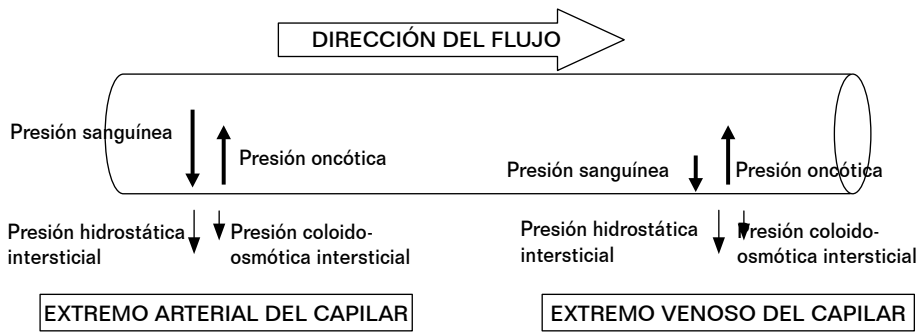
Aunque la concentración de proteínas en el intersticio es muy baja y varía de un tejido a otro, al promediar todos los intersticios el valor de la presión coloido-osmótica se acerca a 8 mm Hg (varía entre 0 y 10 mm Hg). La dirección de esta presión se hace en sentido contrario a la oncótica. Por lo anterior se suma a la sanguínea y a la hidrostática intersticial.

El movimiento neto de líquido dependerá del valor resultante entre las fuerzas que tienden a mover el líquido hacia el intersticio y las que lo hacen en sentido contrario

En la Figura 5.2 se muestran las fuerzas de Starling. Se esquematiza la dirección de cada una de las presiones que interviene en la filtración. En el cuadro anexo se muestra el valor de cada presión y la presión resultante que es la que finalmente determina la dirección del movimiento.

Desde el extremo arterial hasta el extremo venoso, los valores de las presiones se modifican continuamente. La presión sanguínea disminuye progresivamente de 30 a 10 mm Hg. La oncótica aumenta hasta cerca de la mitad del capilar y después disminuye hasta alcanzar casi los valores iniciales porque el agua regresa; la hidrostática intersticial se hace menos negativa pudiendo llegar a cero o hacerse positiva, pero luego se recupera el valor en el extremo venoso cuando el líquido retorna al capilar; y la coloido-osmótica intersticial disminuye hacia el centro del capilar y luego aumenta hasta alcanzar su valor inicial.

Figura 5.2. Se muestran las presiones que intervienen en el proceso de filtración, las fuerzas de Starling.



Extremo arterial		Extremo venoso
30	Presión sanguínea	10
28	Presión oncótica	28
8	Presión coloido-osmótica	8
3	Presión hidrostática intersticial	3
$(30+8+3) - 28 =$ 13 mm Hg	Presión neta o efectiva de filtración (pnf)	$(10+8+3) - 28 =$ -7 mm Hg

En el extremo arterial la suma de las presiones que mueven agua hacia el intersticio (presión sanguínea + presión coloido - osmótica intersticial + presión hidrostática intersticial) es mayor que la presión que retiene agua dentro del vaso (presión oncótica). Por consiguiente el plasma libre de proteínas, pero con los demás solutos, pasa al intersticio.

A medida que se recorre el capilar, el valor de las presiones va cambiando: la presión sanguínea disminuye, la oncótica aumenta, la hidrostática intersticial se hace menos negativa (o sea que aumenta) y la coloido-osmótica del intersticio disminuye.

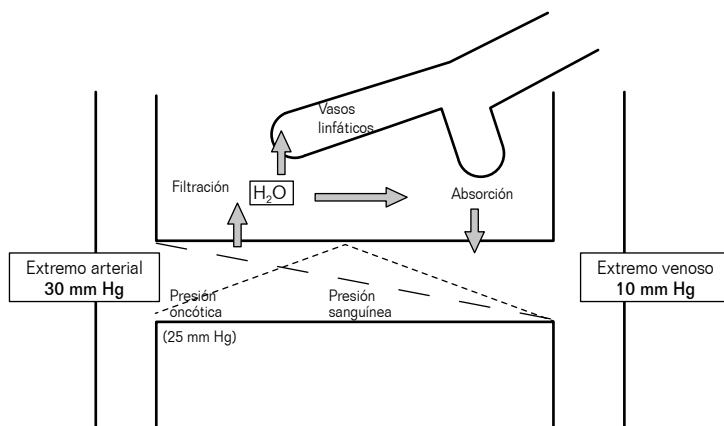
Cerca de la mitad del capilar, las presiones que van en una dirección, son iguales a las que van en sentido contrario y la presión neta o efectiva de filtración es cero, lo que significa que **no hay movimiento de líquido** en ninguna dirección. A partir de ese punto, la PNF se invierte porque la presión oncótica que aumentó progresivamente cuando el agua se movió hacia el intersticio, supera la suma de las otras tres. Por consiguiente, el líquido que se desplazó hacia el intersticio, empieza a devolverse al vaso sanguíneo.

5.2.3 La linfa

Al finalizar el recorrido por el capilar y llegar al extremo venoso, casi todo el líquido ha retornado al compartimiento vascular; una pequeña cantidad que no regresa forma la linfa. En el intercambio normal de los líquidos en los capilares sistémicos, los linfáticos juegan un papel importante. En reposo, con un gasto cardiaco de 5,8 litros /min, el volumen filtrado en toda la red capilar es de 15 ml / min y de estos regresan 12 ml / min; los 3 ml / min restantes quedan en el intersticio, entran al sistema linfático y a través del conducto torácico son devueltos a la circulación venosa. Para un periodo de 24 horas los linfáticos devuelven a la sangre entre 2 y 4 litros de linfa con un contenido de proteínas considerable.

El líquido que se filtró y no retornó a la circulación en el extremo venoso debe ser drenado por el sistema linfático y finalmente devuelto al sistema vascular³⁴ (Figura 5.3).

Figura 5.3. En el extremo arterial del capilar sistémico, el plasma se filtra hacia el intersticio porque la presión sanguínea es mayor que la oncótica; en el extremo venoso el líquido que se filtró debe regresar hacia la circulación porque la presión oncótica es mayor que la presión sanguínea. El volumen que no regresa se moviliza hacia los vasos linfáticos para ser devuelto a la circulación.



Los linfáticos se originan como pequeños canales unicelulares con uniones intercelulares laxas que funcionan como micro-válvulas; van convergiendo para formar conductos más grandes con escaso músculo liso para finalmente llegar a la circulación venosa desembocando en las venas subclavias derecha e izquierda y conectar con las correspondientes venas yugulares internas. Las válvulas restringen el movimiento retrógrado de la linfa. Los linfáticos están anclados a los tejidos circundantes por medio de filamentos finos que tienen la función de abrir los espacios entre las células endoteliales para permitir la entrada de macromoléculas y proteínas. La presión tisular, la actividad muscular intermitente, la contracción del músculo liso de los conductos linfáticos y el abundante sistema de válvulas unidireccionales facilitan el flujo de la linfa hacia el sistema venoso.

Solo el cartílago, el hueso, los epitelios y los tejidos del sistema nervioso están exentos de vasos linfáticos. Son muy abundantes en piel, sistema respiratorio, genitourinario, gastro-intestinal y músculo.

El volumen de líquido transportado por los linfáticos en 24 horas es casi igual al volumen total de plasma del organismo; alrededor de 2.5 L de líquido linfático entran al sistema cardiovascular cada día. También es la vía para devolver aproximadamente entre una cuarta parte y la mitad de las proteínas plasmáticas circulantes por la sangre en un día. Estos vasos constituyen el único mecanismo mediante el cual las proteínas que salen del compartimento vascular pueden regresar a la sangre. Si los vasos linfáticos no eliminaran estas proteínas, se acumularían en el espacio intersticial y constituirían una fuerza oncótica que atraería el líquido de los capilares sanguíneos y causaría edema. Las grasas absorbidas en el tubo digestivo son transportadas haciendo parte de la linfa, en forma de quilomicrones.

El drenaje linfático juega un papel importante en la dinámica de los líquidos en el proceso de la filtración. Si el flujo de linfa se obstaculiza, el líquido intersticial aumenta su volumen y las presiones intersticiales se modifican, generando la retención de líquidos que se denomina “linfedema”.

El equilibrio de las fuerzas de Starling ^(*) determina la distribución estable del volumen entre los dos compartimientos extracelulares. De forma general, estas fuerzas están ajustadas para que alrededor de $\frac{1}{4}$ del LEC se encuentre en el sistema vascular y el resto esté ocupando el espacio intersticial.

Son varios los factores que participan para mantener el proceso de filtración y por lo tanto son diversas las situaciones en que el proceso se puede alterar. El aumento de la presión sanguínea o la disminución de la presión oncótica constituyen la causa más común de acumulación de líquido en el intersticio con la tendencia a la formación de edemas.

Producen disminución de la presión neta de filtración (PNF) o presión efectiva de filtración y por consiguiente una disminución del paso de plasma hacia el intersticio:

- La hipovolemia que lleva a hipotensión porque hay una disminución de la presión sanguínea en el extremo arterial del capilar.
- La vasoconstricción localizada que disminuye el flujo y la presión en la región comprometida, también disminuye la presión sanguínea en el extremo arterial del capilar sistémico.
- El aumento en la concentración de proteínas plasmáticas (hiperproteinemia)
- La disminución de la negatividad de la presión hidrostática intersticial.
- La disminución del flujo por el sistema linfático porque al no drenar el líquido acumulado en el intersticio, este se acumula, la presión hidrostática intersticial aumenta y disminuye la PNF.

Producen un aumento de la presión neta de filtración y del movimiento de líquido hacia el intersticio con la posibilidad de formar edemas:

- El aumento de presión arterial.
- La vasodilatación localizada porque aumenta el flujo y la presión en los capilares distales.
- La hipoproteinemia porque disminuye la presión oncótica.
- El aumento de proteínas en el intersticio como puede ocurrir cuando se aumenta la permeabilidad del endotelio por efecto de agentes químicos.

Cuando se disminuye el drenaje del flujo por el sistema linfático hay tendencia al edema porque propicia el almacenamiento del líquido en el intersticio. Al retenerse líquido en el intersticio, disminuye la presión coloido-osmótica intersticial y aumenta la presión hidrostática intersticial (se hace menos negativa y tiende a cero).

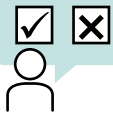


Pregúntese y respóndase

- ¿Qué es presión hidrostática?
- ¿Cuándo se habla de presión negativa y cuándo de presión positiva?
- ¿En qué punto del sistema cardiovascular es mayor la presión sanguínea?
- ¿En qué punto del sistema cardiovascular es menor la presión sanguínea?
- ¿Qué es presión coloido-osmótica y qué es presión oncótica?
- ¿Por qué la presión hidrostática intersticial es negativa?
- ¿Qué es presión neta de filtración y cuál es el valor en el lado arterial y cuál en el venoso del capilar?
- ¿En qué condiciones se aumenta la PNF y en cuáles se disminuye?
- ¿Qué es y cómo se forma un edema?

(*) Ernest Starling (1866-1927). Fisiólogo británico que aportó a la ciencia médica entre muchos descubrimientos, la ecuación que explica las presiones que determinan la filtración en los capilares (1896), la presencia de secreciones hormonales gastro-intestinales como la secretina, la ley de Starling del corazón y múltiples estudios sobre circulación y fisiología renal.

AUTOEVALUACIONES Y TALLERES



Estos talleres han sido diseñados para apoyar su aprendizaje. Lea cuidadosamente cada pregunta y analice las opciones. Trate de seleccionar la respuesta más acertada. Sustente su respuesta. **Algunas veces puede encontrar más de una opción.** ¡No se quede con dudas! ¡Analice, investigue, pregunte!

1. Elabore un esquema sencillo en el que se muestre cómo cae la presión sanguínea en los segmentos vasculares. Identifique los gradientes de presión en cada segmento vascular. Recuerde las cifras de presión de las cavidades cardiacas con sus rangos de variabilidad.
2. En el siguiente cuadro, llene con el valor correspondiente

CAPILAR SISTÉMICO		
	Extremo arterial	Extremo venoso
P. sanguínea		
P. oncótica		
P hidrostát interst		
P. coloi-osm intest		
PRESIÓN NETA		

CAPILAR PULMONAR		
	Extremo arterial	Extremo venoso
P. sanguínea		
P. oncótica		
P hidrostát interst		
P. coloi-osm intest		
PRESIÓN NETA		

CAPILAR GLOMERULAR RENAL		
	Extremo aferente	Extremo eferente
P. sanguínea		
P. oncótica		
P hidrostát interst		
P. coloi-osm intest		
PRESIÓN NETA		

3. ¿Cómo se modifica la presión neta de filtración en el capilar sistémico cuando hay un aumento del volumen sanguíneo circulante (hipervolemia)?
4. Explique cuáles serán los efectos sobre la presión neta de filtración si después de una pérdida considerable de sangre, el volumen sanguíneo se repone con solución salina.

5. Si se produce una vasoconstricción generalizada, la presión de filtración **no** se modifica.
- a. Verdadero
 - b. Falso

Explique su respuesta:

6. Si se administra una sustancia que produzca vasodilatación localizada, el aumento del movimiento de líquidos se debe a:
- a. Disminución de la resistencia al flujo
 - b. Aumento de la presión sanguínea en el capilar
 - c. Aumento del flujo
 - d. Todas las anteriores

7. ¿Qué mecanismos se pueden emplear para disminuir la presión efectiva de filtración o presión neta de filtración en el lado venoso del capilar sistémico? Explique paso a paso.

8. A partir de los procesos que permiten la filtración en el lecho capilar, ¿qué tendría que ocurrir para que la presión hidrostática intersticial se hiciera positiva?

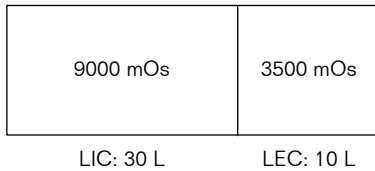
9. ¿Qué ocurriría con la filtración si la permeabilidad de los capilares se aumenta exageradamente? Explique todos los mecanismos.

10. Si el ventrículo izquierdo falla y no puede bombear sangre al circuito mayor, ¿sobre cuál lecho vascular se notarán los efectos y cuales serían estos?

11. Si se obstruye el drenaje linfático, ¿cómo se altera la filtración en los dos lados del capilar sistémico?

12. Explique las repercusiones de la hipovolemia en los procesos de filtración en el capilar sistémico.

Analice la siguiente gráfica y conteste las preguntas que aparecen a continuación, teniendo en cuenta los datos que allí se muestran:



13. La osmolaridad del compartimiento intracelular expresada en mOs/l es:
 - a. 280
 - b. 290
 - c. 300
 - d. 310
 - e. 320

14. La osmolaridad del compartimiento extracelular en mOs/l es:
 - a. 300
 - b. 320
 - c. 330
 - d. 345
 - e. 350

15. ¿Cuánta agua debe desplazarse entre los compartimientos para equilibrar la osmolalidad entre los dos compartimientos?

16. Una vez ocurra el desplazamiento osmótico, la osmolalidad de los compartimientos en mOs/L será:
 - a. 295
 - b. 300
 - c. 312
 - d. 325
 - e. 330

17. Si se disminuye la presión osmótica del plasma, ¿cuál respuesta puede ocurrir?
 - a. Paso de agua desde el intersticio al compartimiento vascular
 - b. Deshidratación celular
 - c. Disminución del volumen urinario
 - d. Disminución de la secreción de hormona antidiurética
 - e. Paso de solutos desde la célula al LEC

18. ¿Cuál de los siguientes mecanismos aumentará la presión neta de filtración en los capilares sistémicos?
 - a. Aumento de la presión coloido-osmótica
 - b. Disminución de la presión capilar en el lado arterial
 - c. Vasodilatación en la porción proximal del capilar
 - d. Disminución de la presión del capilar en el lado venoso
 - e. Aumento de líquido en el intersticio.



Capítulo 6

Regulación hidroelectrolítica - mecanismos de control



Objetivos

Al concluir el capítulo 6, el estudiante estará en capacidad de:

1. Identificar las variables del líquido extracelular que están relacionadas con la composición de los compartimientos cuando se analizan como soluciones acuosas.
2. Diferenciar los sensores o receptores que participan en la regulación del control hidroelectrolítico teniendo en cuenta su ubicación en el organismo.
3. Establecer las diferencias entre los sensores de presión alta y sensores de baja presión o de volumen considerando las características de los vasos sanguíneos donde están ubicados.
4. Describir la respuesta fisiológica a los cambios de presión y de volumen en condiciones de normalidad.
5. Analizar el comportamiento de los osmorreceptores ante un cambio en la osmolaridad del LEC y las respuestas integradas que se presentan para controlarlo.
6. Explicar la función que cumplen los riñones como órganos sensores y efectores en el control de la composición de los compartimientos.
7. Analizar las respuestas hormonales básicas que participan en la regulación hidroelectrolítica.
8. Comparar las respuestas de corto y mediano plazo cuando se presentan alteraciones en la presión, en el volumen y en la osmolaridad.

6. Regulación hidroelectrolítica - mecanismos de control

Para mantener condiciones compatibles con la vida, es necesario conservar una relativa constancia en la composición de los compartimientos hidroelectrolíticos. El compartimiento extracelular se modifica constantemente debido al intercambio con el medio externo y para evitar que se presenten cambios nocivos en el compartimiento intracelular, el LEC debe recuperar las condiciones iniciales de “normalidad”. Para ello, el organismo cuenta con una serie de “sensores” especializados, con la capacidad de responder a modificaciones en las señales específicas e iniciar respuestas cuyo objetivo es recuperar el estado de equilibrio que se alteró.

Los sensores o receptores son células nerviosas especiales diseñadas para responder a un estímulo específico, están localizadas en contacto con el LEC y en particular con el plasma o con la sangre monitoreando sus características relacionadas con presión, volumen y osmolaridad. La información de los sensores activa los sistemas de regulación para controlar y mantener la homeostasis³⁵.

Las principales variables que se deben controlar relacionadas con la homeostasis hidroelectrolítica son:

- a. la osmolaridad de los compartimientos y particularmente la del plasma
- b. la presión que ejercen los líquidos en los compartimientos, fundamentalmente la presión sanguínea, que es presión hidrostática.
- c. el volumen de los compartimientos, principalmente el volumen del LEC

Para el monitoreo de las variables mencionadas, los sensores o receptores son de tres tipos:

- 6.1 Sensores de osmolaridad u osmorreceptores
- 6.2 Sensores de alta presión o barorreceptores
- 6.3 Sensores de baja presión o de volumen.

Aunque en casi todos los casos, los sensores interactúan para mantener la regulación, se analizará de manera independiente cada uno de ellos; posteriormente se tratará de hacer la integración funcional de todos los sensores.

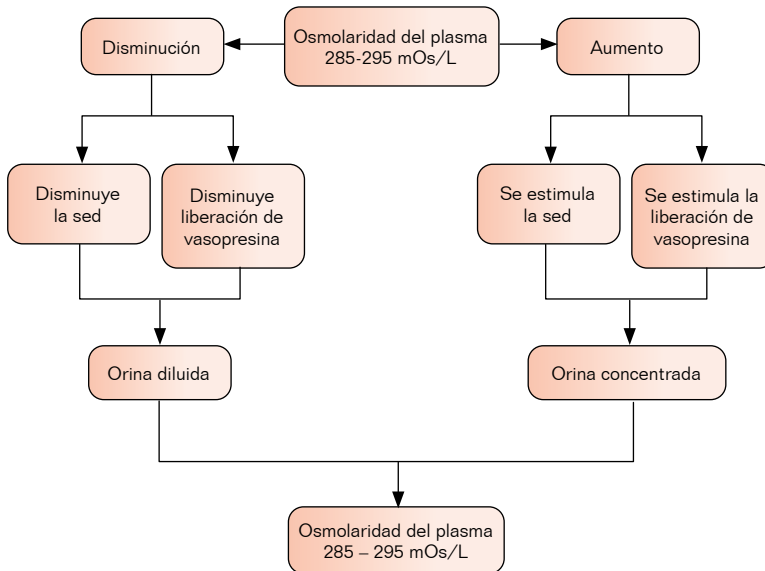
6.1 Sensores de osmolaridad - osmorreceptores

Son células nerviosas ubicadas en regiones hipotalámicas, muy sensibles, que responden a mínimas variaciones de la osmolaridad plasmática tales como del 1%. Las zonas osmorreceptoras carecen de barrera hematoencefálica, se encuentran en el órgano vasculoso de la lámina terminal (OVLT), el órgano subfornical (OFS) y en región preóptica del hipotálamo.

La osmolaridad de los líquidos del organismo es aproximadamente 290 a 295 mOs/L y es el resultado del adecuado balance hídro-electrolítico. Las células osmorreceptoras del hipotálamo, relacionadas con el núcleo supraóptico y paraventricular, son de importancia en el control de los mecanismos de la sed y de la secreción de Hormona Anatidiurética (HAD) o vasopresina. Cuando hay un exceso de la ingesta de agua libre, la osmolaridad de LEC puede descender hasta 280 mOs/L. El descenso de la osmolaridad del LEC propiciaría el desplazamiento osmótico de líquido hacia el LIC aumentando el volumen celular. Se activan respuestas que favorecen la normalización: se inhibe la sensación de sed y los niveles de HAD disminuyen (Figura 6.1).

Por el contrario, si disminuye la ingesta de agua o hay pérdida adicional de agua libre, la osmolaridad del LEC aumenta y cuando alcanza valores superiores a 295 mOs/l, se estimula la sensación de sed y la secreción de HAD. Cuando los niveles plasmáticos de HAD superan los 5 pg/ml, los túbulos renales logran su máxima permeabilidad al agua. La concentración final de la orina depende de la permeabilidad del tubo colector (que a su vez depende de la HAD) y del gradiente de concentración de intersticio medular renal. La altísima sensibilidad de los osmorreceptores y la respuesta de la HAD a la retroalimentación, garantizan que cambios pequeños en la osmolaridad produzcan efectos marcados en la concentración de la orina.

Figura 6.1. Los cambios en la osmolaridad del plasma son regulados rápidamente por dos mecanismos: la secreción de vasopresina (HAD) y la sensación de sed. El control final lo realiza el riñón aumentando o disminuyendo el volumen de orina formado, así como la concentración de solutos.



Cuando se produce un balance negativo de agua los solutos del organismo que no se equilibran libremente de ambos lados de la membrana celular (por ejemplo, sodio, potasio, cloro) aumentan su concentración. El aumento de la osmolalidad extracelular (tonicidad) mueve agua del interior de las células al líquido extracelular. Esto disminuye el volumen de las mismas. En órganos cerebrales –ubicados alrededor de los ventrículos– llamados “órgano vasculoso de la lámina terminal” (OVLT) y “órgano subfornical” (SFO), donde no hay barrera entre la sangre y el encéfalo, existen neuronas (osmorreceptores) estimuladas por este cambio osmolar que conectan con neuronas del hipotálamo ubicadas en los núcleos supraópticos (SON) y paraventricular (PVN) de la hipófisis posterior. Los osmorreceptores responden a la reducción de volumen generando potenciales de acción que liberan glutamato en dichos núcleos estimulando la síntesis de vasopresina*. En los mismos órganos –a través de las mismas células y diferentes señales o a través de células diferentes– es estimulada la sed cuando cambios del 1% de la tonicidad ya han estimulado la síntesis y liberación de la vasopresina. En los SON y PVN se sintetiza y libera la vasopresina (Hormona Antidiurética, HAD), nonapéptido que poseen todos los mamíferos.

Cuando se presenta una hipovolemia, la respuesta inmediata incluye activación de componentes de sistema endocrino y sistema nervioso autónomo, como un mecanismo para evitar la disminución del gasto cardíaco y de la presión arterial. La activación del sistema nervioso autónomo contribuye a aumentar el tono vascular, el retorno venoso, la fuerza de contracción cardíaca y la reabsorción renal de agua y sodio. El aumento de la HAD, el sistema renina-angiotensina-aldosterona, adrenalina/noradrenalina, ACTH y glucocorticoides, actúan directa o indirectamente para retener Na y agua, redistribuir y mantener el flujo sanguíneo regional.

6.1.1 Mecanismos de la sed

La sed es una percepción subjetiva de la necesidad de ingerir líquido. Es un componente importante de los mecanismos que mantienen la homeostasis hídrica y es esencial para la vida³⁶.

La sed puede provocarse por múltiples razones relacionadas con los hábitos, con aspectos culturales, psicogénicos, pero también es la respuesta al aumento de la osmolaridad del LEC, a la disminución de la volemia o al incremento en los niveles plasmáticos de algunas hormonas con actividad dipsogénica. La renina y la angiotensina II tienen un efecto estimulante de la sed (dipsogénico).

La hipovolemia y la hiperosmolaridad provocan sensación de sed por mecanismos diferentes³⁷: la hiperosmolaridad lo hace por la vía de los osmorreceptores; la hipovolemia, por medio de los barorreceptores y por la secreción de renina-angiotensina (ver Figura 6.2).

6.1.2 Hormona Antidiurética

También llamada vasopresina por sus efectos vasopresores en el músculo liso vascular, es un nonapéptido que se sintetiza en el núcleo supraóptico del hipotálamo y se transporta por los axones para almacenarse en la neurohipófisis^{38,39}. El principal estímulo para la secreción de HAD es el aumento de la osmolaridad plasmática por medio de los osmorreceptores hipotalámicos, pero también responde a la hipovolemia y a la hipotensión (Figura 6.3).

Figura 6.2. Mecanismos de producción de sed. La hiperosmolaridad estimula los osmorreceptores mientras que la hipovolemia lo hace por medio de los barorreceptores y del sistema renina-angiotensina.

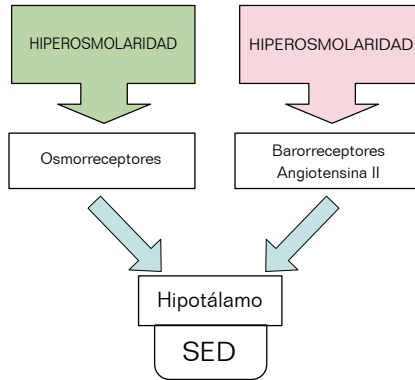
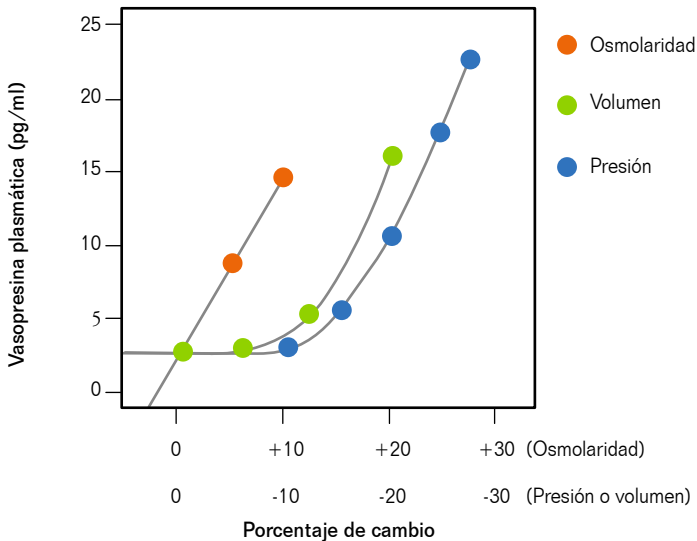


Figura 6.3. La figura muestra la respuesta secretora de la HAD o vasopresina a las variables que estimulan su secreción. En el eje de la y se muestra la secreción de la hormona y en el eje de la x, las tres variables que modifican su secreción. Se observa claramente que los cambios en la osmolaridad son los que más impactan la secreción; los cambios en el volumen deben comprometer casi el 10% para lograr efectos significativos y en cuanto a la presión, los cambios deben ser mayores.



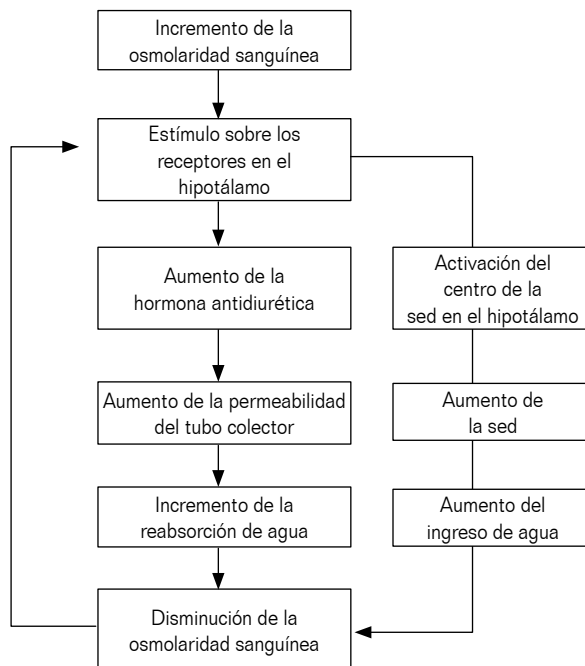
Hay tres tipos de receptores para la vasopresina: V_{1A} , V_{1B} (o V_3), V_2

Los efectos renales mediados por los receptores V_2 son:

- Aumenta la velocidad de inserción de canales de agua (acuaporinas AQP 2) que están almacenados en los endosomas, en la membrana luminal de los tubos colectores
- Activa los transportadores de úrea
- Aumenta transitoriamente absorción de Na en tubo distal

El efecto neto de la HAD o vasopresina es el aumento de la reabsorción renal de agua libre³⁹ lo que lleva a la disminución de la diuresis y a la recuperación de la osmolaridad (Figura 6.4). Las acciones extrarrenales de la HAD incluyen contracción de músculo liso cardiovascular (V1) y estímulo a la secreción de ACTH (V3).

Figura 6.4. La vasopresina se libera por el efecto del aumento de la osmolaridad plasmática sobre los osmorreceptores. Su función es aumentar la permeabilidad de los tubos colectores renales para favorecer la reabsorción de agua y normalizar la osmolaridad plasmática.



El volumen del líquido extracelular y particularmente el volumen sanguíneo está determinado principalmente por el equilibrio entre el ingreso y el egreso de agua y de iones. En un periodo largo de tiempo, los ingresos y los egresos deben ser iguales. Una alteración de la volemia modifica los valores de presión sanguínea y pueden estar relacionados con la osmolaridad.



Pregúntese y respóndase

- ¿Cuáles son los sensores que existen en el organismo para controlar el agua y los iones?
- ¿Qué tipo de células son los receptores?
- ¿Dónde se encuentran los receptores para la osmolaridad del plasma?
- ¿Cómo se estimulan o inhiben los osmorreceptores?
- ¿Qué respuesta se presentan cuando se aumenta la osmolaridad plasmática?
- ¿Qué respuesta se presenta cuando se disminuye la osmolaridad plasmática?
- ¿Cómo se estimula la sensación de sed?
- ¿Qué respuesta produce la hormona antidiurética?
- ¿Qué tipo de receptores media la actividad de la HAD?

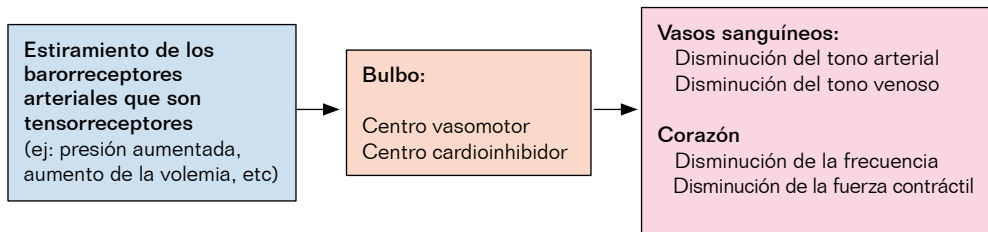
6.2 Regulación de la presión sanguínea por medio de los barorreceptores

Una de las variables que se relaciona directamente con la distribución de los líquidos entre los compartimientos del LEC es la *presión sanguínea*. Aunque la distribución de los solutos también afecta el movimiento del agua, la mayor parte de ellos se distribuye sin restricción entre los dos compartimientos extracelulares (intersticio y plasma) y no se comportan como osmoles eficaces. Solamente las proteínas plasmáticas actúan como osmoles eficaces porque no atraviesan los capilares y por ello generan una presión (presión coloido-osmótica) reteniendo agua en el compartimiento donde estén.

La presión con la que llega la sangre al capilar (presión hidrostática, presión sanguínea) es el principal factor que determina el movimiento del plasma desde el espacio intravascular hacia el intersticio y viceversa. El valor de la presión sanguínea capilar depende primordialmente de la fuerza de contracción del corazón, del volumen sanguíneo y de la resistencia que oponen los vasos al movimiento de la sangre.

Los sensores de presión alta o barorreceptores se localizan al inicio del sistema arterial (sistema de presión alta) para que cuando se presenten los cambios, la respuesta de ajuste permita que la distribución de la sangre se normalice y llegue al capilar en condiciones óptimas para que se realice la perfusión. Son células nerviosas especializadas que se localizan en la adventicia de los vasos sanguíneos (cayado aórtico y seno carotideo) y se estimulan por la distensión de las paredes vasculares.

Cuando se aumenta la presión arterial y se estimulan los barorreceptores por estiramiento (mecanorreceptores, tensorreceptores), se generan potenciales de acción en los nervios aferentes aumentando el número de impulsos que llegan por el nervio de Hering y el vago hasta el Núcleo del Tracto Solitario (NTS) en el bulbo raquídeo. La frecuencia de descarga está relacionada con el grado de estiramiento (tensión).



Las neuronas del NTS estimulan la formación reticular caudal ventrolateral, la cual inhibe la formación rostral ventrolateral e inhibe la actividad simpática (centro vasomotor, CVM). (Ver Figura 6.5). Al inhibir el simpático se produce vasodilatación y disminución de la secreción de adrenalina de origen suprarrenal. Las neuronas del NTS también hacen sinapsis con las neuronas parasimpáticas del núcleo ambiguo y el núcleo motor del vago (centro cardioinhibidor) para disminuir la frecuencia y la fuerza de contracción cardíacas; disminuye así el gasto cardíaco. La estimulación vagal y la inhibición simpática tienden a normalizar las cifras de presión arterial.

En la figura 6.6 se muestra la relación entre la frecuencia de descarga de los barorreceptores sobre el CVM, con los cambios de presión. A partir de una presión arterial media normal de aproximadamente 100 mm Hg, se observa cómo la frecuencia de descarga aumenta si aumenta la presión arterial media, provocando una inhibición al centro vasomotor.

Figura 6.5. Reflejo barorreceptor: los receptores de tensión (barorreceptores) de la aorta o las carótidas responden a un aumento de presión, incrementando su frecuencia de descarga sobre el centro vasomotor, lo que produce una disminución de la descarga del CVM sobre las fibras musculares lisas de los vasos sanguíneos con la consecuente vasodilatación.

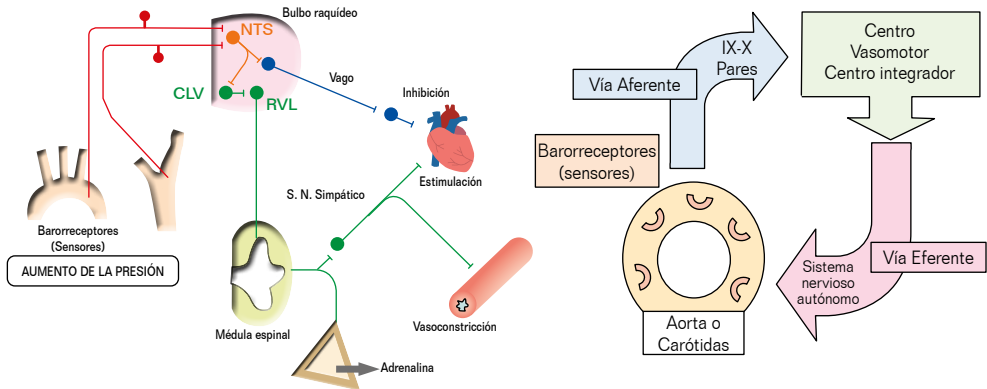
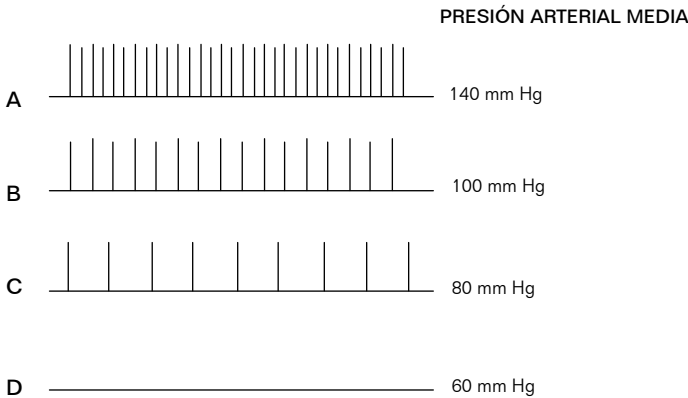


Figura 6.6. Frecuencia de descarga de los barorreceptores con distintas presiones arteriales



Cuando la presión arterial media cae por debajo de 60 mm Hg, los barorreceptores dejan de descargar permitiendo que la acción del CVM se manifieste sin inhibiciones y por consiguiente produciendo vasoconstricción máxima para tratar de normalizar la presión.

Los barorreceptores responden muy rápidamente a los cambios de presión pero responden más a una presión que varía que a una presión que permanece constante. Su respuesta disminuye con el tiempo porque se adaptan.

El sistema de barorreceptores controla el aumento y la disminución de la presión arterial que se presentan durante el día y garantiza el intercambio hídrico entre el plasma y el intersticio.



Pregúntese y respóndase

- ¿Dónde están localizados los sensores de presión alta o barorreceptores?
- ¿Cómo actúan los barorreceptores?
- Describa el reflejo barorreceptor.
- ¿Qué es el centro vasomotor y dónde se encuentra?
- ¿Cómo se regula el tono vascular?
- Cuando la presión disminuye, ¿cómo responde el organismo para mantener la perfusión?
- ¿Por qué los barorreceptores no son efectivos a largo plazo?
- Relacione la frecuencia de descarga de los barorreceptores con valores de presión sanguínea

6.3 Sensores de baja presión o de volumen

En las aurículas, en las arterias pulmonares y en los vasos sanguíneos de baja presión hay receptores de distensión que se estimulan principalmente por aumento de la volemia. La respuesta al aumento de tensión de las paredes de estos vasos produce varias respuestas:

- a. Liberación del péptido natriurético auricular cuyo principal efecto es disminuir la reabsorción renal de sodio produciendo natriuresis y por consiguiente diuresis osmótica.
- b. Disminución de la secreción de Hormona Antidiurética que disminuye la reabsorción de agua en los tubos colectores favoreciendo la pérdida de líquidos por el riñón.

6.3.1 Péptido o factor natriurético atrial (FNA)

El Factor Natriurético Atrial es sintetizado y liberado por los miocitos auriculares en respuesta a la distensión de la pared de las aurículas que puede ser por un aumento del líquido extracelular. El incremento del LEC provoca un aumento en el retorno venoso y en consecuencia una mayor distensión en la pared auricular.

El FNA actúa en la membrana de la célula blanco por medio de tres tipos de receptores NPR-A, NPR-B y NPR-C

En el Cuadro 1 aparecen las principales acciones del FNA.

A nivel renal los principales efectos son:

- Vasodilatación de la arteriola aferente y eferente lo que conduce a un aumento en el Flujo Plasmático Renal y en la Tasa de Filtración Glomerular
- Disminución de la secreción de renina y por ende disminución de la Angiotensina II
- Inhibe la secreción de aldosterona
- Disminución de la permeabilidad de los canales de Na en el tubo colector medular favoreciendo la eliminación renal de sodio, natriuresis acompañada de diuresis osmótica
- Relaja las células mesangiales

Otros péptidos con actividad natriurética han sido descritos: la *urodilatina* relacionada con la pre-FNA, se libera en respuesta a la distensión auricular y a la sobrecarga salina. Su principal acción es producir eliminación urinaria de sodio, cloro y agua.

Cuadro 1. Acciones Biológicas de los Péptidos Natriuréticos

Péptido Natriurético Auricular (PNA) y Péptido Natriurético Cerebral (PNB)
Natriuresis
Vasodilatación arteriolar (disminución de la resistencia)
Inhibición del SRAA
Inhibición del SNS
Inhibición de endotelina
Incremento de la permeabilidad capilar
Antimitogénesis
Péptido Natriurético Endotelial
Vasodilatación arterial y venosa
Inhibición de endotelina
Antimitogénesis
Mínima natriuresis

6.4 Participación renal en el homeostasis hidro-electrolítica

Los riñones son órganos sensores y efectores en el control del agua y de los iones. Como efectores, son blanco para varias hormonas que regulan el manejo facultativo del sodio, del cloro y del agua. Como sensores, poseen receptores en el aparato yuxtaglomerular que responden a cambios en la presión y el volumen sanguíneos, así como a los cambios en la concentración de sodio y cloro.

6.4.1 Sistema renina - angiotensina - aldosterona

El aparato yuxtaglomerular renal conformado por células especializadas de la arteriola aferente, células de la mácula del tubo distal y células mesangiales extraglomerulares se estimula cuando disminuyen la volemia, la presión o la concentración de Na y Cl. La respuesta renal a cualquiera de estos estímulos es la liberación de una hormona preformada y almacenada de naturaleza proteica: *la renina*.

La renina se libera a la sangre y actúa sobre un sustrato, una proteína plasmática producida por el hígado, el angiotensinógeno para producir angiotensina I, la cual es convertida a angiotensina II por una enzima: la ECA (Enzima Conversora de Angiotensina) sintetizada primordialmente en el pulmón.

El sistema renina-angiotensina-aldosterona es un potente regulador del volumen del LEC y de la presión arterial y consiste en una cascada de interacciones entre un sustrato y su enzima para finalmente producir angiotensina II cuyas principales funciones son vasoconstricción y estímulo de la liberación y síntesis de aldosterona (ver Figura 6.7).

Los efectos de la angiotensina II son mediados por receptores específicos en las membranas celulares de las células diana. Se reconocen dos grandes tipos de receptores (Figura 6.8):

- AT_1 que media la mayor parte de los efectos de la angiotensina como son la vasoconstricción, osmorregulación, proliferación celular y es el sitio de acción de algunos antihipertensivos
- AT_2 tiene efectos vasodilatadores, inhibidores de la hipertrofia, etc.

AT_1 y AT_2 parecen tener efectos contrarios, semejan antagonismo fisiológico. En realidad el efecto neto depende la cantidad de receptores en cada tejido.

Figura 6.7. Sistema renina-angiotensina-aldosterona. Los estímulos sobre el AYG son la hipotensión, la hipovolemia y la disminución de Na y Cl. El aumento de renina produce los efectos descritos y el resultado es un aumento de angiotensina II que produce vasoconstricción generalizada y estimula la secreción de aldosterona.

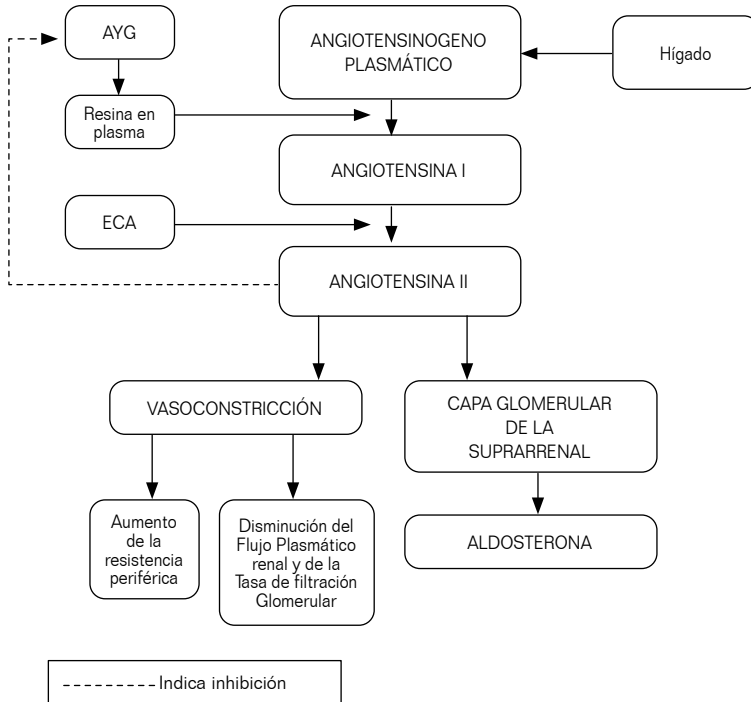
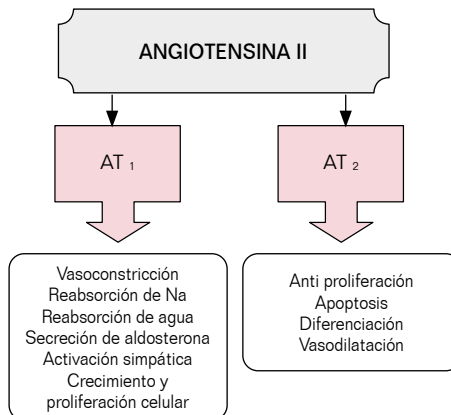


Figura 6.8. Efectos de la Angiotensina mediados por sus receptores; AT₁ y AT₂.



La aldosterona es una hormona esteroidea secretada por la capa glomerular de la corteza suprarrenal cuya función es el control renal del sodio y del potasio. La secreción de aldosterona está regulada por el sistema renina-angiotensina y por los niveles plasmáticos de potasio.

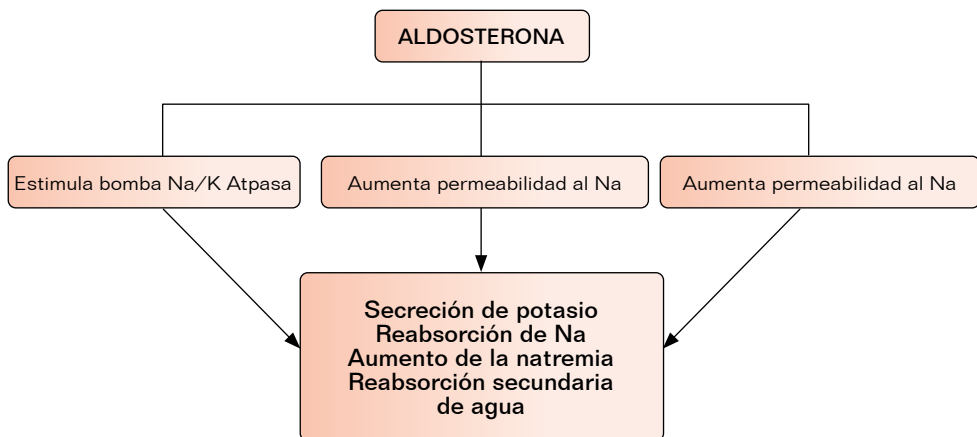
Aunque la aldosterona tiene efectos extrarrenales incrementando la reabsorción de Na^+ en las glándulas sudoríparas y secreciones gastrointestinales, los que se relacionan con la respuesta renal son los más importantes para la regulación hidroelectrolítica.

La aldosterona actúa fundamentalmente sobre las células principales del tubo colector produciendo tres efectos (Figura 6.9).

- Estimula la actividad de la bomba Na/K ATPasa de la membrana basal lo que produce en el interior de la célula una disminución notoria de la concentración de Na y un aumento de la concentración del K^+
- Aumenta la permeabilidad de los canales de sodio en la membrana luminal
- Aumenta la permeabilidad de los canales de potasio en la membrana luminal.

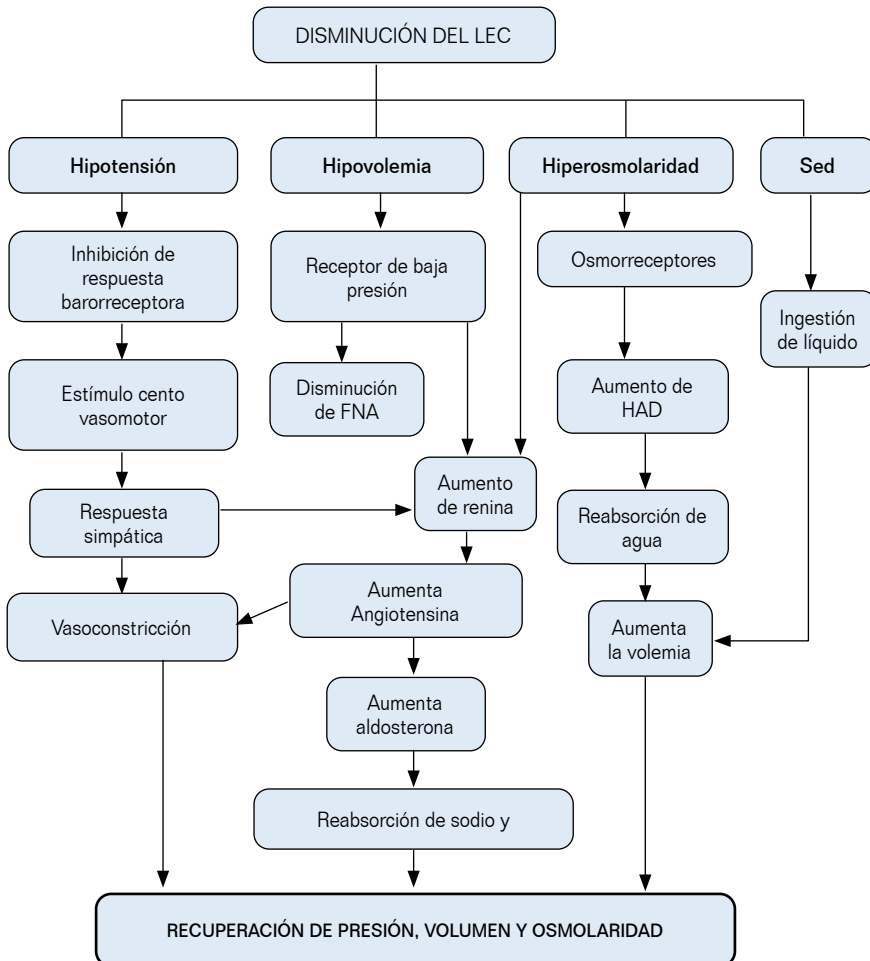
El resultado de estos efectos es: la secreción de potasio hacia la luz tubular (kaliuresis), la reabsorción de sodio hacia los capilares con reabsorción de agua que lleva a aumento de la volemia y de la presión sanguínea.

Figura 6.9. Efectos de la aldosterona sobre las células principales del tubo colector cortical.



La participación de todos los mecanismos que intervienen en el balance hidroelectrolítico ocurre de manera integrada, ordenada y secuencial⁴⁰. El resultado depende fundamentalmente del tipo de estímulo. No se presenta la misma respuesta ni igual secuencia de eventos en una deshidratación iso-osmolar que en una deshidratación hiperosmolar, aunque finalmente se logre recuperar el estado normal, el equilibrio. Los estímulos interactúan, se integran, unos refuerzan a otros y ocasionalmente se antagonizan. Así por ejemplo una hipovolemia favorece la hipotensión, la hipo-osmolaridad puede ser el resultado de un exceso de solvente sin solutos que conduciría a una hipovolemia, etc.

Figura 6.10. Respuesta integrada a una disminución del líquido extracelular.



Las respuestas mediadas por el sistema nervioso autónomo ocurren rápidamente, muchas veces en fracción de segundos como sucede con la respuesta o reflejo barorreceptor. La participación hormonal o humoral requiere un poco más de tiempo, porque implica la liberación de sustancias desde una célula productora y el efecto en otra célula frecuentemente alejada; se necesita un segundo mensajero intracelular, etc.

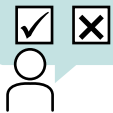
Un ejemplo sencillo puede servir para relacionar la respuesta integrada y la intervención de los efectores. A partir de una deshidratación por cualquier causa, sudoración profusa, diarrea, vómito, etc., se pueden analizar los eventos como se observa en la Figura 6.10.



Pregúntese y respóndase

- ¿Dónde están localizados los receptores de baja presión o de volumen?
- ¿Qué respuestas se presentan cuando se distienden las aurículas?
- ¿Cómo actúa el péptido natriurético atrial?
- ¿Cómo se denominan los receptores del péptido natriurético atrial?
- ¿Cuáles son los principales efectos del FNA en el riñón?
- ¿Cómo actúa la aldosterona en el riñón?
- ¿Qué es diuresis

AUTOEVALUACIONES Y TALLERES



Estos talleres han sido diseñados para apoyar su aprendizaje. Lea cuidadosamente cada pregunta y analice las opciones. Trate de seleccionar la respuesta más acertada. Sustente su respuesta. **Algunas veces puede encontrar más de una opción.** ¡No se quede con dudas! ¡Analice, investigue, pregunte!

1. Si se disminuye la concentración de sodio en el plasma (**hiponatremia**), se puede observar:
 - a. Aumento de la secreción de renina
 - b. Disminución de la liberación de aldosterona
 - c. Aumento en la síntesis de hormona antidiurética
 - d. Aumento del volumen sanguíneo circulante
 - e. Disminución en la presión oncótica del plasma

2. Usted está reponiendo la volemia de un paciente que sufrió **una hemorragia severa** y no tiene a disposición sangre del mismo grupo del individuo. De las soluciones que aparecen a continuación, escogería:
 - a. Dextrosa al 5%
 - b. Solución salina al 0.9%
 - c. Suero glucosalino
 - d. Solución de Hartmann
 - e. Cualquiera de las anteriores

3. La respuesta a la pregunta anterior fue seleccionada por usted, debido a
 - a. La osmolalidad de la solución
 - b. Que lo más importante es recuperar la volemia
 - c. Que la solución escogida es la que más se asemeja al plasma
 - d. Que hay posibilidad de aportarle calorías
 - e. La retención del volumen en el compartimiento vascular

4. Un individuo con **sudoración profusa** puede presentar:
 - a. Disminución de la volemia
 - b. Aumento de la osmolaridad del plasma
 - c. Disminución del cloro total del líquido extracelular
 - d. Disminución del volumen urinario
 - e. todas las anteriores

5. Una de las siguientes funciones corresponde a la **Hormona Antidiurética**:
 - a. Aumenta la reabsorción de agua en el túbulo proximal
 - b. Disminuye la osmolaridad del líquido intracelular
 - c. Aumenta la presión osmótica del plasma
 - d. Disminuye el volumen urinario
 - e. Disminuye la filtración glomerular

6. Al administrar por vía endovenosa **un litro de solución salina** a un individuo de 60 kilos, se puede presentar:
 - a. Aumento de la descarga de los barorreceptores sobre el centro vasomotor
 - b. Activación de los osmorreceptores
 - c. Aumento de la reabsorción obligatoria de sodio
 - d. Liberación de hormona antidiurética
 - e. B y C son correctas

7. Cuando se presenta una de las siguientes condiciones, se produce una **deshidratación hipertónica (o hiperosmolar)**. Señálela:
 - a. Hemorragia
 - b. Vómito y diarrea

- c. Disminución de la aldosterona
- d. Aumento de la hormona antidiurética
- e. Sudoración abundante

Analice el siguiente ionograma para responder las preguntas 8 y 9:

Na: 155 mEq/l; **K:** 3,5 mEq/l;
Ca: 10 mg % **Cl:** 95 mEq/l
Mg: 3 mEq/l

8. De acuerdo con estos valores, la alternativa que podría explicarlos es:
 - a. ede aldosterona
 - b. deshidratación hipo-osmolar
 - c. fiebre y vómito
 - d. hemorragia
 - e. ninguno
9. Del anterior ionograma usted puede afirmar que:
 - a. El calcio está ligeramente aumentado
 - b. La osmolaridad del cloruro de sodio corresponde a 250 mOs / litro
 - c. Si la calcemia también se puede expresar en mEq / l y corresponde a 10 mEq/L
 - d. El valor del cloro en el plasma se debe a la pérdida por riñón
 - e. Todas son correctas

Juanita es una niña de nueve meses que llega al hospital deshidratada por vómito y diarrea abundantes de 24 horas de evolución.

A continuación aparecen variables que pueden o no estar comprometidas con el estado de Juanita. De acuerdo con las siguientes instrucciones responda las cuatro preguntas siguientes:

Señale A si la variable AUMENTA
 Señale B si la variable DISMINUYE
 Señale C si la variable FLUCTÚA
 Señale D si NO CAMBIA

10. Gasto cardiaco.
11. Presión oncótica.
12. Factor Natriurético Atrial.
13. Angiotensina II-
14. Un individuo adulto normal con un peso de 70 kilos y ACT de 60 % muestra los siguientes valores en el plasma: Na: 150 mEq/; Cl: 100 mEq/l y recibe dos litros de una solución que contiene 100 mEq/l de Na y 50 mEq/l de Cl.
 - a. ¿Cuál es la osmolaridad de la solución?
 - b. ¿Cuáles son los valores para la natermia y la cloremia después de haber recibido dicha solución, suponiendo que no hay eliminación urinaria y no hay desplazamiento osmótico?



Aplicaciones

Caso 1

Ignacio es un estudiante universitario, aficionado al deporte quien con frecuencia va al gimnasio y los fines de semana sale a montar en bicicleta con un grupo de amigos. El fin de semana anterior, Ignacio perdió 2 kilos de peso después de un periodo prolongado de ejercicio físico y los repuso con dos litros de agua.

Analice la situación anterior y responda las siguientes preguntas:

1. De las siguientes alternativas, escoja la que podría relacionarse de alguna manera con esta situación
 - a. Aumento de la osmolaridad del líquido intracelular
 - b. Aumento del tamaño del LIC
 - c. Aumento de los osmoles totales del ACT
 - d. Desplazamiento osmótico del LEC al LIC
 - e. B y D son correctas
2. Antes de la reposición del volumen, ¿cuál de las siguientes sustancias esperaría encontrar aumentada con respecto a la situación de normalidad?
 - a. Sodio
 - b. Potasio
 - c. Proteínas plasmáticas
 - d. Cloro
 - e. Todas de las anteriores
3. Una vez se ha recuperado el volumen, la respuesta fisiológica que se puede presentar se asocia con:
 - a. Disminución de la hormona antidiurética
 - b. Disminución de aldosterona
 - c. Aumento de renina
 - d. Aumento de factor natriurético
 - e. A y C son correctas

4. Después de reponer el volumen es posible que usted encuentre uno de los siguientes valores:
- Na: 150 mEq/l
 - K: 5 mMol/l
 - Glucosa: 80 mg%
 - HCO₃⁻: 30 mOs/l
 - Proteínas: 5,5 gramos %

Caso 2

Arnoldo es un paciente de 38 años que llega al servicio de urgencias traído por su esposa, Rosario, porque desde ayer empezó a sentir “cólicos” en el estómago después de almorzar en el restaurante “El Trancazo” con varios de sus compañeros de trabajo. Relata el paciente que él comió arroz con pollo y sus compañeros sancocho. Anoche tuvo varios episodios de vómito, muy abundante, presentó además intolerancia a los alimentos y “ni el agua me sirve porque la devuelvo inmediatamente”.

Esta mañana inició diarrea y ha tenido varios episodios, acompañados de “retorcijones”.

Al examinarlo, usted encuentra un paciente en malas condiciones, muy pálido, se queja de debilidad, está adinámico y febril al tacto.

- Talla: 1,76 m Peso: 65 kilos, temperatura: 38,5 ° C; Presión arterial: 105 / 70 mm
- Hg: Pulso: 115 / min; Frecuencia respiratoria: 23 / min
- Ojos hundidos, mucosas secas.

Durante el examen Arnoldo debe ir varias veces al baño porque siente la necesidad imperiosa de vomitar y siente náuseas permanentemente.

Preguntas para el caso de Arnoldo

1. El peso de Arnoldo al momento de la consulta era de 65 kilos y ha perdido 2 kilos. Calcule la distribución de los líquidos antes de la deshidratación y en las actuales circunstancias.

2. Calcule las pérdidas insensibles de Arnoldo para 24 horas.
3. De acuerdo con las vías de pérdida de Arnoldo, usted puede afirmar correctamente que las pérdidas por piel son hipo-osmolares si se comparan con el plasma
 - a. Verdadero
 - b. Falso
4. La palidez de Arnoldo se debe a:
 - a. Vasoconstricción periférica por descarga simpática
 - b. Aumento de la frecuencia de descarga de los barorreceptores
 - c. Oliguria por hipovolemia
 - d. Disminución del FNA
 - e. Ninguna es correcta
5. El ion que más se compromete con los episodios de vómito que presenta Arnoldo es
 - a. El sodio
 - b. El potasio
 - c. El bicarbonato
 - d. El calcio
 - e. El magnesio
6. ¿Cuál de las siguientes hormonas está disminuida cuando Arnoldo llega a la consulta?
 - a. La vasopresina
 - b. La adrenalina
 - c. El factor natriurético
 - d. La renina
 - e. La angiotensina
7. Usted resuelve administrarle a Arnoldo por vía parenteral una solución salina al 0,6 %. ¿Qué osmolaridad tiene la solución?
8. Más tarde usted considera cambiarle la solución por una solución de glucosa que prepara con 500 ml de agua y 25 gramos de glucosa. ¿Cuál es la osmolaridad de la solución (en mOs / l) y cómo es respecto al plasma?

9. La filtración de Arnolde está comprometida debido a una disminución de la presión:
 - a. Oncótica
 - b. Coloido-osmótica
 - c. Hidrostática intersticial
 - d. Sanguínea
 - e. A y C están disminuidas.

10. La participación renal en el control hidroelectrolítico de Arnolde incluye:
 - a. Disminución de la filtración
 - b. Aumento de la resistencia al flujo
 - c. Caída del flujo sanguíneo renal
 - d. Aumento de la permeabilidad de los tubos renales
 - e. Todas son correctas

11. El compromiso sanguíneo que puede estar acompañando la situación de Arnolde es:
 - a. Acidosis metabólica
 - b. Alcalosis respiratoria
 - c. Acidosis respiratoria
 - d. Alcalosis metabólica

12. Una de las siguientes afirmaciones se relaciona con los mecanismos de control de los líquidos. Señálela:
 - a. La HAD retiene agua en la nefrona distal cuando la osmolaridad está aumentada y la volemia
 - b. Los barorreceptores carotídeos y aórticos no se adaptan con facilidad permitiendo que las cifras de presión media permanezcan aumentadas
 - c. El Factor Natriurético Auricular produce disminución del volumen circulante al producir una diuresis osmótica
 - d. Un aumento de la renina circulante favorece la retención de potasio aumentando la osmolaridad
 - e. La vasodilatación producida por la descarga sostenida de los barorreceptores utiliza como mediador la adrenalina

Para responder las siguientes tres preguntas tenga en cuenta el siguiente ionograma de Arnoldo:

Na: 150 mEq/l

Cl: 90 mEq/l

K: 4 mEq/L

16. Este ionograma se puede asociar con:
 - a. Diarrea y sudoración
 - b. Vómito e hiperventilación
 - a. Fiebre y sudoración
 - d. Ejercicio severo
 - e. Solamente sudoración

17. Según estos valores y la respuesta anterior, usted podría suponer que
 - a. La frecuencia cardíaca se aumenta para aumentar el gasto por encima de lo normal
 - b. El hematocrito está aumentado
 - c. Sería fácil producir una alcalosis
 - d. La presión oncótica está disminuida
 - e. El calcio ionizado disminuye marcadamente

18. Uno de los mecanismos de homeostasis en este caso será la disminución de aldosterona para impedir la disminución de potasio y aumentar la volemia.
 - a. Verdadero
 - b. Falso

Preguntas de opción múltiple

Para responder las siguientes cuatro preguntas, analice el siguiente cuadro; en él aparecen cuatro compartimientos separados por membranas semipermeables e identificados con letras. El compartimiento **A** tiene dos litros y 80 gramos de NaCl; el **B** 500 ml y 20 gramos de glucosa; el compartimiento **C** tiene 1 litro de agua y 100 equivalentes de calcio y el compartimiento **D** tiene 1500 ml de agua y 10 moles de CaCl₂.

A: 2 litros NaCl: 80 gr	B: 500 ml Glucosa: 20 gr
C: 1 litro Calcio: 100 eg	D: 1,500 ml CaCl ₂ : 10 moles

19. El compartimiento que tiene menor osmolaridad es:
 - a. A
 - b. B
 - c. D
 - d. Todos tienen la misma osmolaridad

20. El compartimiento con mayor número de partículas es
 - a. A
 - b. B
 - c. C
 - d. D
 - e. Todos tienen el mismo número de partículas

21. ¿Cuál compartimiento **NO** tiene neutralidad eléctrica?
 - a. A
 - b. B
 - c. C
 - d. D
 - e. Ninguno tiene neutralidad eléctrica

22. El mayor movimiento de agua se presenta hacia el compartimiento
 - a. A
 - b. B
 - c. C
 - d. D

23. Una mujer adulta de 60 kilos de peso y ACT de 50 % pierde 3 litros de agua por hiperventilación. Cómo quedan la osmolaridad, la natremia y la cloremia si en condiciones normales los valores eran de:
 - a. Na : 140 mEq/L
 - b. Cl : 90 mEq/l
 - c. Osm: 300 mOs/l



Bibliografía

1. Oparin, A. El origen de la vida. 1ª edición. México (DF): Océano; 2004.
2. Andrulis, ED. Theory of the origin evolution and nature of life. Nature Precedings. 2012;2(1):1-105.
3. Casares, M. Curso de biología, Tema 4: El agua como biomolécula. Consultado el 15 de marzo de 2019. Disponible en: <http://www.bionova.org.es/biocast/documentos/tema04.pdf>
4. Nelson, D, Cox, M. El agua. En: Nelson D, Cox M. Lehninger. Principios de bioquímica. 6ª edición. Barcelona: Omega; 2009. p. 43-65.
5. Reyes, LA. Fisicoquímica. En: Reyes, LA. Propiedades de los líquidos. México (DF): McGraw Hill/Interamericana; 2014. p. 96-105.
6. Brawn, LT. Química, la ciencia central. 12ª edición. Barcelona: Pearson; 2014. p. 530-536.
7. Laguna J, Piña E, Martínez F, Pardo JP, Riveros H. Bioquímica. 8ª edición. México (DF): El Manual Moderno; 2018.
8. Behar, DS. Biofísica de las ciencias de la salud. Buenos Aires: Oriente; 2011.
9. Micó, AG. Física médica y biológica. Asunción: EFACIM; 2014.
10. Widmaier, E, Raff, H, Strang, K. Movement of solutes and water across cell membranes. En: Widmaier E, Raff H, Strang K. The mechanisms of body function, Vander's Human Physiology. 15ª edición. Nueva York: Mc Graw-Hill. 2019. p. 79-119.
11. Boron, WF, Emile L. Fisiología médica. 3ª edición. Barcelona: Elsevier; 2017.
12. Ben-Sasson, SA, Grover, NB. Osmosis: A macroscopic phenomenon, a microscopic view. Advances in physiology education. 2003;27(1):15-19.
13. Bollini, A. El fenómeno de la ósmosis. En: Aranalde G, Mujica G, Agüero R, Velzi M. Fisiología renal. 1ª edición. Madrid: Corpus. 2015. p. 75-84.
14. Latorre, R. Biofísica y fisiología celular. 1ª edición. Sevilla: Universidad de Sevilla; 1996.
15. Luquita, A. Soluciones y concentraciones. En: Aranalde G, Mujica G, Agüero R, Velzi M. Fisiología renal. 1ª edición. Madrid: Corpus. 2015. p. 67-73.
16. Koepfen, BM, Stanton, BA. Homeostasis: Volume and composition of body fluid compartments. En: Koepfen BM, Stanton BA. Berne and Levy physiology. 7ª edición. Philadelphia: Elsevier; 2018. p.17-34.

17. Kokko, JP, Tannen, RL. Líquidos y electrolitos. 1ª edición. Argentina: Panamericana; 1998.
18. Cogan A, Martin, C. Fisiología y fisiopatología. 1ª edición. Colombia: Manual Moderno; 1993.
19. Hall, JE. Compartimientos del líquido corporal: líquidos extracelular e intracelular, edema. En: Hall JE. Tratado de fisiología médica de Guyton y Hall. 13ª edición. Barcelona: Elsevier; 2016. p. 285-301.
20. Hall, JE. Formación de la orina por los riñones: I. Filtración glomerular, flujo sanguíneo renal y su control. En: Hall JE. Tratado de fisiología médica de Guyton y Hall. 13ª edición. Barcelona: Elsevier; 2016. p. 303-322.
21. Friis-Hansen, B. Water distribución in the foetus and newborn infant. Acta Paediatr Scand. 1983;72:(Suppl 305):7-11.
22. (22) Hall, JE. Measurement of fluid volumes in the different body fluid compartments –the indicator– dilution principle. En: Hall JE. Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology. 13ª edición. Amsterdam: Elsevier; 2016. p. 305-321.
23. Body composition measurements in infants and children. Report of the 98 th Ross Conference on Pediatric Research. Ross Laboratories. Columbus, Ohio, 1989.
24. Fernández, J, Gastelbondo, R, Maya, LC. Manejo de líquidos y electrolitos en el recién nacido. En: Fernández J, Gastelbondo R, Maya LC. Líquidos y electrolitos en pediatría. 1ª edición. Bogotá: Distribuna; 2008. p. 37-52.
25. Cogan, M. Volúmenes representativos del líquido gastrointestinal y concentraciones de electrolitos. En: Cogan M. Líquidos y electrolitos. Fisiología y fisiopatología. 1ª edición. México (DF): Manual Moderrno; 1993. p. 16-28.
26. (26) Sands, JM, Layton, HE, Fenton, RA. Concentración y dilución de la orina. En: Skorecki K, Chertow GM, Philip A. Brenner y Rector. El riñón. 10ª edición. Amsterdam: Elsevier; 2018. p. 258-280.
27. (27) Nielsen S, Kwon, TH, Frøkiær J, Knepper, MA. Key roles of renal aquaporins in water balance and water-balance disorders. News Physiol Sci. 2000;15:136-143.
28. Cañete, A, Pérez-Serrano P, Polanco, Y. Estudio de los compartimientos corporales en la valoración del estado nutricional infantil. Ciencia Pediátrika. 1994;14:36-46.
29. Olaya, EE. Electrolitos corporales – Iones En: Olaya EE. Líquidos y electrolitos. 1ª edición. Medellín: UPB; 2010.

30. Rose, BD, Post, TW. Agua corporal total y concentración plasmática de sodio. En: Rose BD, Post TW. Trastornos de los electrolitos y del equilibrio ácido-base. 5ª edición. Madrid: Marbán; 2002. p. 242-249.
31. Hall, JE. Formación de la orina por los riñones: II. Reabsorción y secreción tubular. En: Hall JE. Tratado de fisiología médica de Guyton y Hall. 13ª edición. Barcelona: Elsevier; 2016. p. 323-343.
32. Aronson, PS, Boron, WF, Boulpaep, EL. Transporte de solutos y agua. En: Boron WF, Boulpaep EL. Fisiología médica. 3ª edición. Barcelona: Elsevier; 2017. p. 103-140.
33. Hall, JE. Fluid filtration across capillaries is determined by hydrostatic and colloid Osmotic pressures and the capillary filtration coefficient. En: Hall JE. Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology. 13ª edición. Amsterdam: Elsevier; 2016. p. 189-201.
34. Berne, R, Staton B. Berne and Levy Physiology. 7ª edición. Amsterdam: Elsevier; 2018.
35. Antunes-Rodrigues J, De Castro M, Elias LLK, Valença MM, Mccann SM. Neuroendocrine control of body fluid metabolism. *Physiol. Rev.* 2004;84: 169-208.
36. McKinley, MJ, Johnson, AK. The physiological regulation of thirst and fluid intake. *News Physiol Sci.* 2004;19:1-6.
37. Simon, TN. Thirst and hydration: Physiology and consequences of dysfunction. *Physiology & Behavior.* 2010;100:15-21.
38. Repetto, HA. Hormona antidiurética. *Arch Argent Pediatr.* 2014;112(2): 153-159.
39. Danziger, J, Zeidel, ML. Mechanisms of water balance. *Clin J Am Soc Nephrol.* 2015;10:852-862.
40. Molina PE. Endocrine Physiology. 5ª edición. Nueva York: McGraw-Hill; 2018.



SU OPINIÓN



Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto. La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos. Para darnos su opinión, escribanos al correo electrónico: editorial@upb.edu.co
Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre, correo electrónico y número telefónico.

Esta obra está dirigida a estudiantes de Ciencias de la Salud y muy particularmente a los estudiantes de ciencias básicas en los contenidos de los primeros semestres del programa de Medicina.

Es la segunda edición y está actualizada y reforzada de acuerdo con las evaluaciones que se hicieron a quienes utilizaron la obra.

Explora los conceptos fundamentales de la composición hídrica del cuerpo humano y su distribución en compartimientos. Revisa el movimiento de solutos y solvente a través de las barreras o membranas que delimitan los compartimientos. Muestra los sistemas de control y homeostasis que están actuando permanentemente para garantizar la regulación del medio interno.