La ventilación de los pulmones de las aves ocurre de modo similar a la de los pulmones de los reptiles, pero esta acción se intensifica durante el vuelo, con el batir de las alas. A diferencia de los reptiles, las aves son homeotérmicas («de sangre caliente»). Mantienen una temperatura constante del cuerpo (por lo general cerca de 104°F) a pesar de las fluctuaciones amplias de la temperatura del medio externo. Las aves logran mantener constante la temperatura de su cuerpo, principalmente debido al calor que produce su actividad muscular. La actividad muscular, a la vez, depende de la energía que se libera durante la respiración celular. No es entonces sorprendente que la demanda de oxígeno de un ave de pequeño tamaño sea muy grande. Las aves satisfacen la mayor demanda de oxígeno mediante ensanchamientos de los pulmones, denominados **sacos aéreos** (Fig. 13-14). Si bien en los sacos aéreos no ocurre intercambio gaseoso, su distribución anatómica permite incrementar la eficiencia de la ventilación pulmonar, por cuanto el aire fresco pasa a través de los pulmones tanto durante la inhalación como durante la exhalación. Los sacos aéreos también contribuyen a reducir el peso del cuerpo; el aire que contienen reemplaza en muchas regiones del cuerpo los tejidos o los flúidos. Por ejemplo, algunos de los huesos de las aves son huecos y contienen sacos aéreos.

13-8 MECANISMO DE LA RESPIRACION EN EL HOMBRE

Entre los mamíferos la eficiencia de la ventilación pulmonar se supera aún más debido a la presencia del **diafragma**. Este es un tabique muscular, en forma de domo, que divide la cavidad del cuerpo en dos compartimentos: la cavidad abdominal (que contiene las vísceras, estómago, intestinos, etc.,) y la cavidad torácica (que contiene el corazón y los pulmones) (Fig. 13-15). La superficie interior de la cavidad torácica y la superficie exterior de los pulmones están tapizadas con membranas delgadas denominadas **membranas pleurales**. Una película de humedad que se extiende entre estas membranas permite a las pleuras pulmonares adherirse fuertemente a las pleuras de la cavidad torácica.

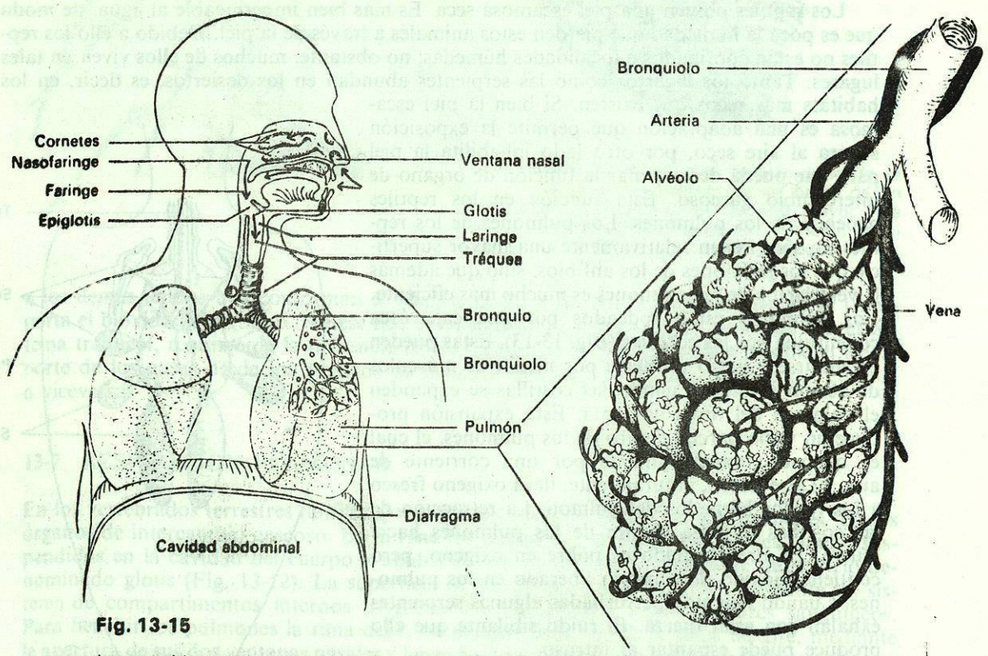

Fig. 13-15

Intercambio gaseoso en el hombre. En los alvéolos ocurre la transferencia del oxígeno y del bióxido de carbono entre el aire y la sangre.

La necesidad de adhesión de los pulmones y las paredes de la cavidad torácica se pone en evidencia cuando el aire penetra entre las membranas pleurales. En este caso se vence la fuerza de adhesión y la elasticidad natural del pulmón obliga a que éste sufra un colapso. Este procedimiento se usa a menudo deliberadamente cuando el pulmón ha sufrido deterioro por enfermedad, por ejemplo la tuberculosis. Este colapso artificial le permite descansar y cicatrizar rápidamente. La reinflación del pulmón no es difícil por cuanto el aire contenido entre las membranas pleurales es absorbido paulatinamente por los tejidos y el pulmón vuelve a asumir su tamaño normal.

Toda acción que incremente el volumen de la cavidad torácica incrementa también el volumen de los pulmones, por estar éstos adheridos a las paredes de la cavidad. La dilatación de la caja torácica cumple esta función, como ocurre en los reptiles y en las aves; pero en los mamíferos (incluyendo el hombre) la acción se complementa mediante contracciones del diafragma, lo cual conlleva un aumento en el volumen de la cavidad torácica. Esto a la vez dilata los pulmones y el aire puede penetrar en ellos. Cuando el diafragma se relaja vuelve a adoptar su posición anterior, lo cual permite a los pulmones reasumir su tamaño anterior. Al mismo tiempo el aire es impulsado hacia afuera.

Los movimientos del diafragma en la respiración complementan, pero de ningún modo sustituyen, la acción de la caja torácica. El movimiento de las costillas es regulado por medio de los músculos intercostales externos e internos. Durante la inspiración (inhalación) los músculos intercostales externos se contraen elevando las costillas y desplazándolas hacia fuera (Fig. 13-16). Este movimiento produce un aumento del volumen de la cavidad torácica, lo cual permite que el aire penetre en los pulmones. Durante la expiración (exhalación) los músculos intercostales externos se relajan. Esto y la elasticidad natural de los pulmones hacen que la cavidad torácica vuelva a adoptar su tamaño normal. El ciclo de inspiración y expiración se repite de 15 a 18 veces por minuto, en un adulto en estado de reposo. Durante cada ciclo se inhalan y exhalan unos 500 ml. de aire.

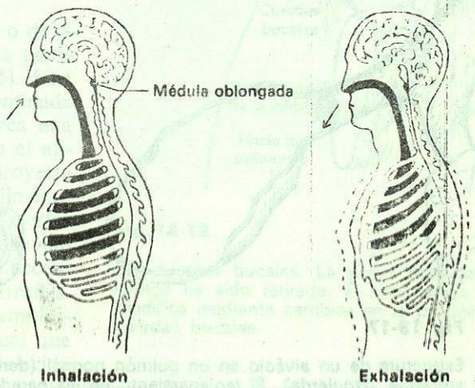

Fig. 13-16

Durante la inspiración (inhalación), las costillas se levantan y expanden hacia fuera; el diafragma desciende, la frecuencia y la profundidad de la respiración es controlada por medio de impulsos nerviosos que se originan en la médula oblongada.

La frecuencia de la respiración puede, naturalmente, intensificarse ya sea conscientemente o durante períodos de ejercicio intenso. La inspiración vigorosa ocurre simplemente como resultado de una contracción más vigorosa del diafragma y de los músculos intercostales externos. La expiración vigorosa depende en mayor medida, sin embargo, de la contracción elástica de tales músculos y de los pulmones. Los músculos intercostales internos impulsan las costillas hacia abajo y hacia arriba, reduciendo así, aún más, el volumen de la cavidad torácica. Al mismo tiempo la pared muscular del abdomen se contrae, impulsando el estómago, el hígado, etc., hacia arriba contra el diafragma, con lo cual se reduce también, en la misma dirección, el volumen de la cavidad torácica. Mediante inspiración y expiración vigorosa un hombre adulto promedio puede movilizar en cada ciclo cuatro litros de aire. Esto se conoce con el nombre de **capacidad vital** de los pulmones. Los atletas bien entrenados poseen una capacidad vital considerablemente mayor que la de personas corrientes. Pero aún después de que la inhalación de aire haya alcanzado el punto máximo, queda en el pulmón un remanente de cerca de 1200 ml. de aire («aire residual»).

13-9 EL RECORRIDO DEL AIRE DURANTE LA RESPIRACION EN EL HOMBRE

La ventilación de los pulmones depende, como es obvio, de que no haya interrupción en los conductos que comunican los pulmones con el aire exterior. Durante la inhalación el aire entra en las ventanas nasales, atraviesa las **cavidades nasales** (una detrás de cada ventana nasal), pasa a la **nasofaringe** y luego (uniéndose con el aire que haya podido penetrar por la boca) a la faringe oral (Fig. 13-15). De la faringe oral, el aire sigue por la **glotis** y va a la

laringe (aparato de la voz) y de allí sigue hacia el conducto principal del aire, la **tráquea**. Las paredes de la tráquea están reforzadas mediante bandas de cartílago en forma de herradura. Estas bandas impiden que la tráquea se cierre como resultado de la compresión que pudieran ejercer los tejidos adyacentes. La tráquea se ramifica y da origen a los **bronquios**, derecho e izquierdo, los cuales van al pulmón derecho y al pulmón izquierdo, respectivamente. Los bronquios se ramifican en numerosos **bronquiolos**. También las paredes de los bronquios y de los bronquiolos principales están reforzados con cartílagos. Cada bronquiolo termina en un conglomerado de pequeños sacos en forma de un racimo de uvas, que reciben el nombre de **alvéolos**. En los alvéolos tiene lugar finalmente el intercambio gaseoso. Se ha calculado que el área total disponible para el intercambio gaseoso proporcionada por 300 millones de alvéolos, en los dos pulmones adultos, fluctúa entre 400 y 800 pies cuadrados. Compárese esta cifra notable con el área de la piel de un hombre de 68 kilos de peso y 1,78 metros de estatura, equivalente a 1,85 m^2.

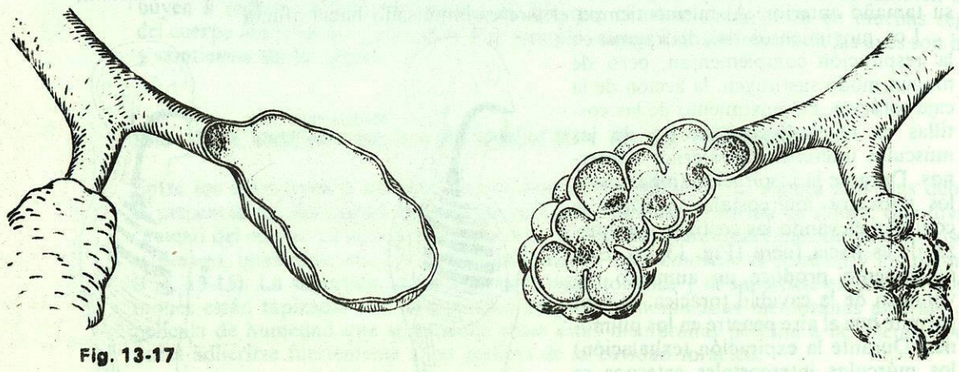

Fig. 13-17

Estructura de un alvéolo en un pulmón normal (derecha) y de un pulmón que ha sido víctima de enfisema (izquierda). El replegamiento de las paredes alveolares reduce el área disponible para el intercambio gaseoso.

El área considerable de los alvéolos es suficiente para suplir la demanda de intercambio gaseoso del cuerpo, tanto en estado de reposo como de actividad. Bajo ciertas condiciones, sin embargo, el área de los pulmones disponible para el intercambio gaseoso puede reducirse considerablemente. Por ejemplo, las infecciones bacterianas o virales de los alvéolos producen la **neumonía**. Cuando ocurre esta enfermedad, se acumulan linfa y mucus en los alvéolos y en los bronquiolos, con lo cual se reduce el área expuesta al aire. En casos críticos el paciente se torna de color azul debido a la escasez de oxígeno. Si se coloca el paciente bajo una cámara de oxígeno, donde respira oxígeno puro, puede salvársele la vida. La mayor concentración de oxígeno inhalado hace más efectiva la utilización del área todavía disponible para el intercambio gaseoso.

Otra enfermedad de los pulmones que conlleva la reducción del área de intercambio gaseoso, es el **enfisema**. En esta enfermedad muchas de las paredes que separan los alvéolos se irritan y repliegan hacia adentro. Ello reduce el área disponible para el intercambio gaseoso (Fig. 13-17). A diferencia de la neumonía, esta condición se desarrolla lentamente y raras veces ocasiona directamente la muerte. Sin embargo, la disminución gradual del área disponible para el intercambio gaseoso obliga el corazón a bombear mayores cantidades de sangre a los pulmones para satisfacer las demandas de intercambio gaseoso del cuerpo. El mayor esfuerzo desarrollado por el corazón puede conducir a su colapso.

Los funcionarios de salud pública han desarrollado varios estudios sobre el enfisema y han podido comprobar que la respiración de aire contaminado por polución determina que la enfermedad revista caracteres de mayor gravedad. Ello comprende tanto el aire contaminado por los desperdicios industriales, escapes de los vehículos y el aire contaminado dentro de cada individuo por el humo del cigarrillo. Algunos funcionarios de salud opinan que en muchos casos la contaminación del aire puede inclusive ser la causa de la enfermedad.

Mientras el aire se inhala del exterior hacia los alvéolos, es «condicionado». En la cavidad nasal el aire fresco se calienta, humedece y filtra. Estas operaciones son aceleradas por medio de los cornetes (Fig. 13-15), que proporcionan superficie adicional de contacto entre el aire y las membranas húmedas de las cavidades nasales. El mucus secretado por células especiales eleva la humedad del aire inhalado. El mucus también funciona a manera de una trampa pegante ya que a él se adhieren las partículas de polvo que hubieran podido penetrar con el aire inhalado. Células ciliadas limpian el mucus y las partículas extrañas acumuladas, las cuales van hacia la faringe, donde pueden ser expectoradas o tragadas. Debe aquí anotarse que el aire que penetra por la boca no está tan bien acondicionado como el aire que penetra a través de las ventanas nasales.

Pero sea que el aire provenga de la boca o de la nariz, pasa por la faringe, se dirige hacia la glotis y hacia la apertura del esófago (Fig. 13-15). Una banda de tejido ubicada sobre la glotis, denominada epiglotis, contribuye a evitar que se produzca una interferencia de funciones. Cuando se traga el alimento la epiglotis automáticamente se proyecta sobre la glotis, para evitar que porciones del alimento penetren en la laringe y en la tráquea. En ciertas ocasiones cuando el alimento o el agua se extravían y siguen por «el camino viejo», un violento acceso de tos expulsa rápidamente las partículas extrañas.

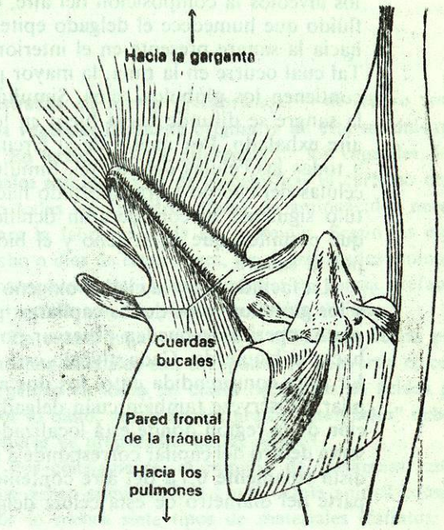

Fig. 13-18

Las cuerdas bucales. La pared posterior de la laringe ha sido retirada. El tono de la voz se modifica mediante cambios en la tensión de las cuerdas bucales.

La **laringe**, u órgano de la voz, es una amplificación de una porción de la tráquea; al igual que las demás porciones de la tráquea está fortalecida por el cartílago. A medida que la voz de los adolescentes se hace más profunda, la laringe aumenta de tamaño. Como resultado de ello el cartílago que la cubre se pronuncia sobre la superficie de la garganta y forma la llamada «manzana de Adán».

A lo ancho de la laringe se extienden dos bandas de tejidos denominadas **cuerdas bucales** (Fig. 13-18). Estas pueden ponerse en tensión a diferentes grados, por medio de un sistema de palancas musculares y cartilaginosas. Cuando el aire (por lo general, cuando es exhalado) pasa por las cuerdas bucales tensas, las hace vibrar. Esta vibración simultáneamente hace vibrar armoniosamente el aire de la laringe, la faringe y la boca. Las vibraciones del aire producen los sonidos que emitimos cuando hablamos y cantamos. Si se modifica la tensión de las cuerdas bucales se altera también el tono del sonido. Mediante movimientos de la lengua y de otras partes de la boca el sonido se fracciona en las distintas unidades fonéticas que conforman el lenguaje hablado. A veces las cuerdas bucales pueden infectarse e inflamarse. Esto produce la voz ronca o aun la pérdida total de la voz, como ocurre cuando se presenta la afección denominada **laringitis**.

Las paredes internas de la tráquea, los bronquios y bronquiolos están cubiertas por un epitelio constituido por células ciliadas que secretan mucus. Aquellas partículas que no pudieron ser filtradas por la nariz son atrapadas en este mucus. Los cilios limpian este material y lo llevan hacia la tráquea. Cuando se aproxima el mucus a la glotis, se produce la exhalación violenta compulsiva de la tos que lleva el mucus a la boca. Este material denominado **esputo** puede ser tragado o expulsado mediante expectoración.

El intercambio de gases propiamente dicho se lleva a efecto sólo en los alvéolos. Un examen retrospectivo de la Fig. 13-19 mostrará la transformación que experimenta en los alvéolos la composición del aire, en un caso típico. Parte del oxígeno se disuelve en el flúido que humedece el delgado epitelio de los alvéolos. Desde allí, el oxígeno se difunde hacia la sangre presente en el interior de los numerosos capilares que irrigan los alvéolos. Tal cual ocurre en la rana, la mayor parte del oxígeno se combina con la hemoglobina que contienen los glóbulos rojos. Simultáneamente parte del bióxido de carbono presente en la sangre se difunde hacia fuera en los alvéolos, desde donde puede ser expulsado con el aire exhalado. Por medio de la circulación de la sangre el oxígeno es luego transportado a todas las células del cuerpo. Simultáneamente el bióxido de carbono es recogido en las células del cuerpo y transportado hacia los capilares, que rodean los alvéolos. En el capítulo siguiente se considerarán detalles complementarios sobre los mecanismos químicos que permiten que el oxígeno y el bióxido de carbono sean transportados adecuadamente por la sangre.

La facilidad con la cual el oxígeno y el bióxido de carbono pasan del aire de los alvéolos a los glóbulos rojos de los capilares, puede apreciarse con ayuda de la Figura 13-20. En la parte superior se pueden observar porciones de dos alvéolos, uno hacia la derecha y otro hacia la izquierda. Cada alvéolo está tapizado por células epiteliales alargadas y delgadas. La zona comprendida entre los dos alvéolos está ocupada casi completamente por un capilar. Obsérvese también cuán delgada es la célula que forma la pared capilar, con excepción de la región donde está localizado el núcleo. El objeto de color gris oscuro que se observa dentro del capilar corresponde a un glóbulo rojo. En el punto más cercano su superficie dista solamente 0,7 μ del aire contenido en el alvéolo, es decir, ¡menos aún que la décima parte del diámetro de esta célula delgada!

Digestión

Los nutrientes

Hemos visto en el capítulo precedente que una célula vegetal puede sobrevivir si dispone de agua y sustancias minerales y se le proporciona carbono orgánico, o bien si ella es capaz de sintetizarlo. Partiendo de estos tres grupos de sustancias nutritivas, toda célula vegetal puede construir todos los demás componentes de su protoplasma. En cambio, si a una célula animal se le proporcionan únicamente estos tres tipos de sustancias nutritivas, muere pronto. Ello se debe a que necesita tres tipos adicionales de sustancias nutritivas, las cuales, a diferencia de la célula vegetal, no puede fabricar por sí misma.

En primer lugar, el agua, los minerales y el carbono orgánico fotosintetizado no proporcionan nitrógeno orgánico utilizable, necesario, por ejemplo, para la construcción de proteínas y ácidos nucleicos. El nitrógeno orgánico puede presentarse en forma de grupos amino $—NH_2$, y las plantas pueden producir $—NH_2$ a partir de nitratos minerales (cap. 7). Pero los animales no pueden hacerlo. Por lo tanto, sus células deben ser abastecidas con $—NH_2$ prefabricado o con otras formas de nitrógeno orgánico disponible. La fuente de suministro deben ser los vegetales o bien animales que hayan comido vegetales.

En segundo lugar, las plantas pueden convertir el aldehído fósforo-glicérico (ALPG) o la glucosa, u otras formas de carbono orgánico, en todas las vitaminas que necesitan. Los animales no. La mayoría de éstos fabrican alguna de las vitaminas, pero en muchos casos sólo en cantidades inadecuadas. Las posibilidades específicas varían aquí según las especies, pero ninguna es tan autosuficiente en este aspecto como una planta verde. Por consiguiente, las vitaminas que faltan deben ser suministradas en forma prefabricada, y de nuevo son aquí los vegetales la fuente originaria de este suministro.

En tercer lugar, a diferencia de los vegetales, los animales son incapaces de transformar el carbono orgánico en todas las veintitrés clases de aminoácidos necesarios para la fabricación de las proteínas. Según las especies, ocho o diez de estas clases, los denominados aminoácidos "esenciales", deben suministrarse en forma prefabricada y también son las plantas la fuente última.

En cuarto lugar, también a diferencia de las plantas, muchos animales son incapaces de convertir el carbono orgánico en todas las clases necesarias de ácidos grasos. Por lo tanto, varios ácidos grasos "esenciales" deben obtenerse ya preparados de las plantas

Por consiguiente, el mínimo de sustancias nutritivas que deben suministrarse a una célula animal comprende por lo menos siete tipos de materiales distintos: *agua, sustancias minerales, carbono orgánico, nitrógeno orgánico, vitaminas, aminoácidos esenciales* y *ácidos grasos esenciales*. Evidentemente los animales no pueden vivir sin las plantas, las cuales les proporcionan estos siete tipos de sustancias (fig. 12.1).

Si un animal pudiese obtener todas las sustancias nutritivas que precisa en forma de moléculas puras inmediatamente utilizables, no precisaría de un sistema digestivo. Le bastaría entonces absorber simplemente tales moléculas del ambiente a través de las superficies celulares. Éste es, efectivamente, el tipo de nutrición que utilizan diferentes tipos de seres heterótrofos, por ejemplo, los saprofitos y muchos parásitos. Pero, además del agua y de los minerales en ella disueltos, los animales comedores no disponen fácilmente de moléculas nutritivas directamente utilizables. Dichos animales disponen del protoplasma vegetal o animal, vivo o muerto, y debe

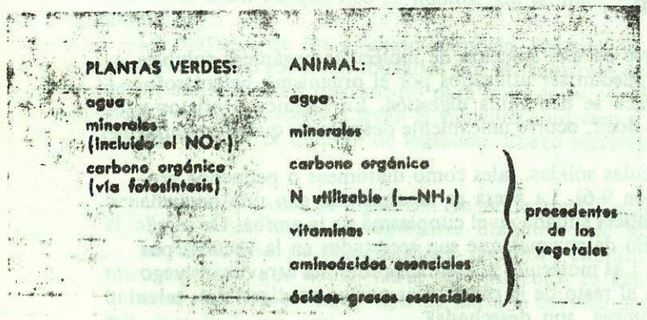

Fig. 12.1. Comparación de las mínimas exigencias alimenticias de los vegetales y animales.