

Figura 1. Los homeotermos son animales capaces de regular su temperatura corporal de manera automática e independientemente de la temperatura del medio. Para lograrlo, liberan la energía química contenida en los alimentos. Las aves y los mamíferos son animales homeotermos.

1. La circulación es una función vital

Todos los seres vivos interactúan con su entorno para incorporar nutrientes y otras sustancias que les sirven para obtener energía y cumplir sus funciones vitales. Una vez incorporadas, estas sustancias son transformadas en otras más sencillas que el organismo utilizará para liberar la energía contenida en ellas, o bien, para integrarlas a sus células. Estos procesos producen residuos que deben ser eliminados para mantener el equilibrio químico de todo el organismo.

Este proceso de llevar o transportar las sustancias a todo el organismo y llevar los desechos hasta los lugares en donde deben ser eliminados se denomina **circulación**. Esta corresponde a la conducción o transporte de sustancias nutritivas y desechos metabólicos desde y hacia las diferentes células del organismo, en el caso de los seres vivos pluricelulares, o al interior celular, en el caso de los organismos unicelulares.

Desde el punto de vista evolutivo, el sistema de transporte en los seres vivos se relaciona con la complejidad de los mismos y las condiciones ambientales que han enfrentado a lo largo del tiempo y que dieron como resultado el desarrollo de diferentes mecanismos, estructuras o sistemas de circulación o transporte. Por ejemplo, en los organismos unicelulares, como las bacterias y los protozoos, las sustancias circulan en forma más sencilla que en los organismos pluricelulares, porque la distancia entre el lugar por donde ingresan los nutrientes y las otras partes del cuerpo son muy cercanas. Por el contrario, en los organismos pluricelulares hacer llegar los nutrientes a cada célula y, al mismo tiempo, remover de ellas las sustancias de desecho que se generan durante el metabolismo, exigió la formación de estructuras cada vez más especializadas para asegurar la realización óptima de estos procesos.

De otra parte, las condiciones ambientales extremas como el frío intenso también generan otras adaptaciones del sistema circulatorio. Los pingüinos son ejemplo de esta situación. Estas aves tienen un sistema circulatorio que les permite mantener una temperatura corporal estable, debido a que las arterias y las venas de sus extremidades están situadas muy cerca, de tal manera que pueden intercambiar calor.



MENTES BRILLANTES

La imagen muestra la variación de la temperatura en diferentes zonas de la cabeza y las patas de un lobo ártico.



Analiza

1. La temperatura es menor en la parte inferior de las patas y en la nariz. ¿A qué atribuyes este hecho?
2. La temperatura del ambiente es de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la temperatura corporal del lobo ártico es de $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto es posible gracias al flujo sanguíneo. ¿Crees que la sangre circula más rápido o más despacio en las patas del animal? Justifica tu respuesta.
3. En este caso, ¿qué relación tiene el proceso de circulación con la regulación de la temperatura? Argumenta.



1.1 Estructuras y mecanismos de transporte

La **circulación** o **transporte de sustancias** desempeña un papel fundamental en la homeostasis o equilibrio interno del organismo. Permite la distribución de los nutrientes que se han obtenido gracias a procesos digestivos, y la circulación de sustancias que el organismo produce y que contribuyen a su adecuado funcionamiento. También transporta las sustancias de desecho hasta los lugares donde deben ser eliminados, y en muchos organismos, contribuye a regular la temperatura corporal.

El transporte de sustancias en los seres vivos se realiza mediante tres estructuras generales: *membrana celular*, *vasos o conductos* (sistema vascular) y *sistemas circulatorios*.

1.1.1 Transporte a través de la membrana celular

Los organismos unicelulares, como las bacterias y los protozoos, y algunos pluricelulares relativamente simples, como las esponjas de mar, carecen de tejidos diferenciados. Por esta razón en ellos el intercambio y transporte de sustancias con su medio se realiza a través de la **membrana celular**. Para este intercambio la célula dispone básicamente de dos procesos: el **transporte pasivo** y el **transporte activo**.

El **transporte pasivo** se realiza sin gasto de energía y puede ocurrir por *difusión simple*, *difusión facilitada* y *ósmosis*. La **difusión simple** es el paso de sustancias de una zona de mayor concentración a una de menor concentración. De esta forma se intercambia el oxígeno y el dióxido de carbono (figura 2a). La **difusión facilitada** se realiza con la ayuda de proteínas transportadoras que tienen un poro o canal para permitir el paso de iones pequeños como el sodio, el potasio y el cloro (figura 2b). La **ósmosis** es el movimiento de agua a través de la membrana plasmática, que es semipermeable, es decir, que permite el paso de algunas sustancias y evita el paso de otras de manera selectiva. Este proceso lo estudiarás en detalle en la unidad 3.

El **transporte activo** permite el paso de sustancias o moléculas que no pueden atravesar la membrana celular. La razón puede estar relacionada con el gran tamaño de las moléculas de, por ejemplo, nutrientes como la glucosa y los aminoácidos. También puede deberse a la necesidad de pasar de un sitio de menor concentración a uno de mayor concentración. Este mecanismo implica un gasto de energía y se realiza por medio de *proteínas transportadoras* (figura 2c).

1.1.2 Transporte a través de vasos o conductos

Se realiza a través de conductos o tubos y se denomina **sistema vascular**. Es propio de las plantas traqueófitas, entre las que se encuentran las gimnospermas y las angiospermas.

1.1.3 Transporte a través de sistemas circulatorios

La mayoría de animales posee un sistema de transporte de sustancias más complejo compuesto por un corazón, vasos sanguíneos y un líquido circulante que, conforma un sistema circulatorio propiamente dicho. El **corazón** se encarga de impulsar o bombear la sangre a todas las células del organismo. Los **vasos sanguíneos** son conductos de diverso calibre por donde viaja la sangre. El líquido circulante, generalmente llamado **sangre**, transporta nutrientes, materiales de desecho y demás sustancias.

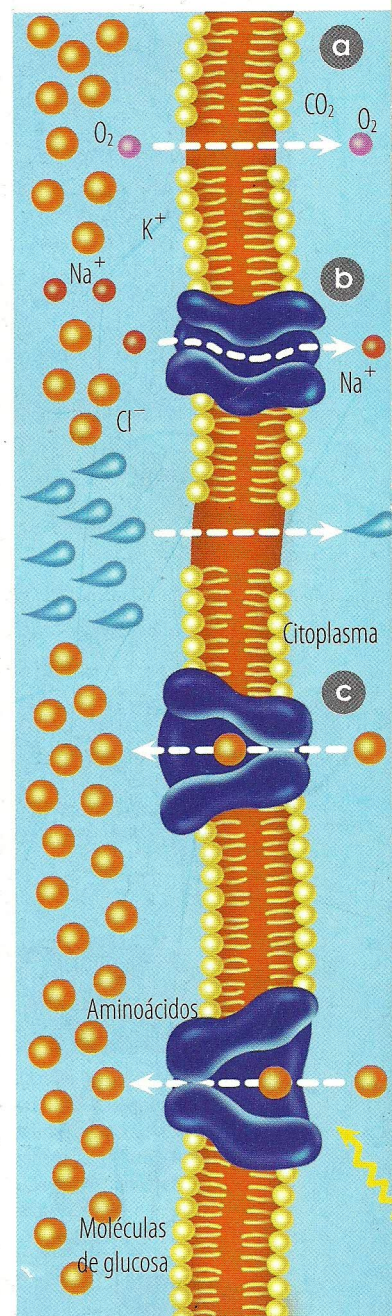
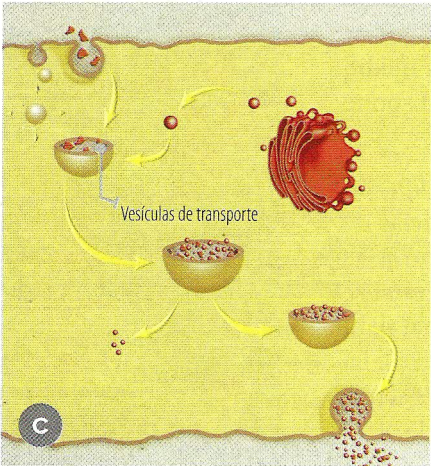
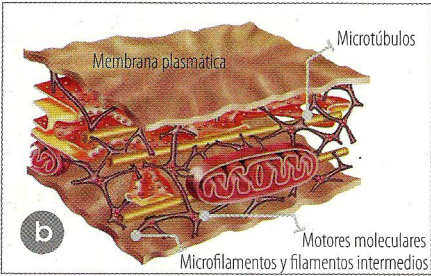
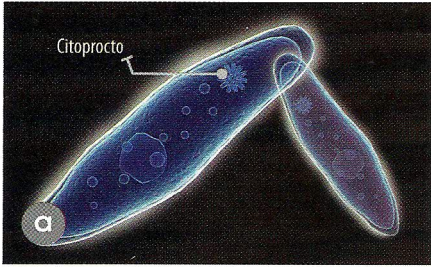


Figura 2. Los seres vivos realizan el transporte de sustancias a través de diferentes mecanismos: (a) *Difusión*, de esta forma se intercambia oxígeno y dióxido de carbono. (b) Los iones entran a la célula por *difusión facilitada*. (c) Las moléculas grandes entran a la célula por *transporte activo*.



1.2 Circulación en organismos unicelulares

Los **organismos unicelulares** del reino mónera, como las bacterias; del reino protista, como los protozoos y las algas; y del reino de los hongos, como las levaduras no tienen sistemas circulatorios especializados. Los nutrientes ingresan a la célula a través de la membrana celular, por medio de los mecanismos de transporte pasivo y activo ya descritos. Cuando las sustancias se encuentran en el interior de la célula, son transportadas al lugar donde se necesitan, gracias a tres tipos de movimientos: *movimientos citoplasmáticos*, *motores moleculares* y *vesículas de transporte*.



1.2.1 Movimientos citoplasmáticos

Son corrientes o movimientos originados en el citoplasma por acción de la entrada y salida de sustancias como el agua. La consistencia líquida del citoplasma facilita este tipo de movimientos. El paramecio, por ejemplo, transporta su alimento en las vacuolas que son impulsadas por movimientos citoplasmáticos alrededor del cuerpo para distribuir sus nutrientes. Luego, la parte que no se asimiló sale al exterior por un orificio de salida, denominado **citoprocto** (figura 3a). Un movimiento citoplasmático característico de las células vegetales es la **ciclosis**, que ocurre gracias a los microfilamentos del citoesqueleto.

1.2.2 Motores moleculares

Los **motores moleculares** son estructuras celulares que están formadas por proteínas que se desplazan por el citoesqueleto, el cual les sirve de soporte (figura 3b). Sujetas al citoesqueleto, se encuentran las proteínas que enlazan los organelos o las estructuras celulares que se van a transportar y las llevan hasta el lugar donde se necesita. Mediante este mecanismo se transportan mitocondrias, lisosomas y filamentos del citoesqueleto, entre otros.

1.2.3 Vesículas de transporte

Son microscópicas esferas que se forman a partir de un compartimiento membranoso y se mueven por las vías del citoesqueleto. Al llegar al lugar indicado, se fusionan con la membrana del compartimiento correspondiente y allí entregan la sustancia que han transportado (figura 3c).

Figura 3. Los organismos distribuyen las sustancias dentro de sus células por medio de movimientos citoplasmáticos (a), motores moleculares (b) y vesículas de transporte (c).

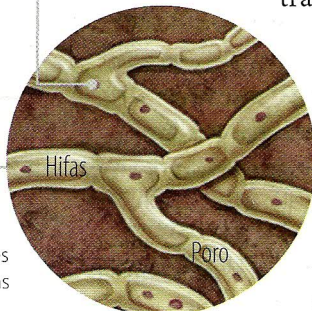
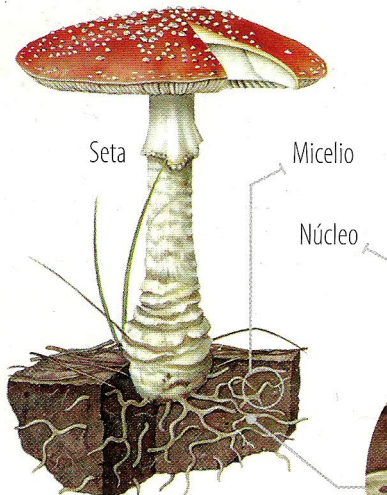


Figura 4. Las hifas de los hongos multicelulares se componen de células multinucleadas que se comunican con las células adyacentes a través de poros que facilitan la circulación de sustancias de una célula a otra por difusión.

1.3 Circulación en hongos

Los **hongos multicelulares**, como los champiñones, poseen estructuras denominadas **hifas**, cuyas paredes celulares tienen unos poros que permiten que el protoplasma fluya entre ellas por difusión (figura 4).

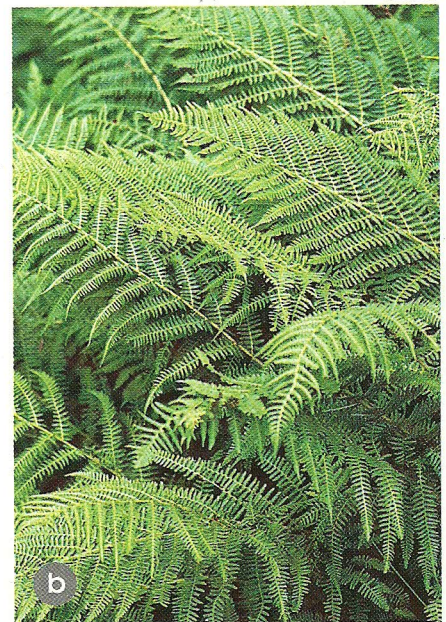
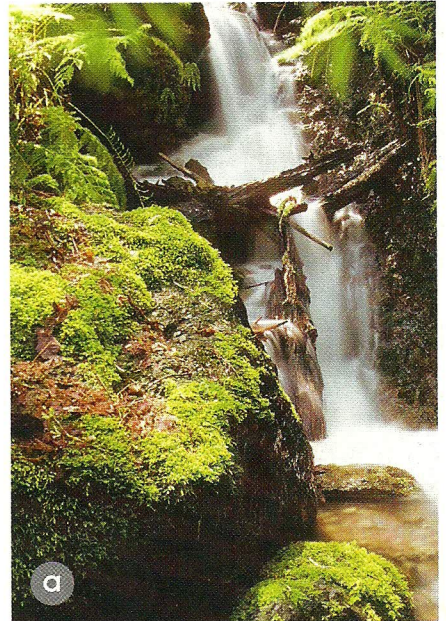


1.4 Circulación en plantas

Las plantas son organismos autótrofos que fabrican alimentos por medio del proceso de **fotosíntesis**. Para realizarlo, toman del medio agua, sales minerales y dióxido de carbono que son transformados en materia orgánica, por medio de la luz solar, en presencia de un pigmento llamado **clorofila**. Como este proceso tiene lugar principalmente en las hojas de las plantas, se requiere que sean transportados los materiales necesarios hasta estos órganos. De igual forma, una vez fabricados los alimentos, es necesario transportarlos a todas las partes de la planta donde se necesitan. El transporte tanto de la materia prima de la fotosíntesis como de los alimentos fabricados, es realizado mediante difusión o por medio de sistemas vasculares.

1.4.1 Circulación en plantas no vasculares

Las **plantas no vasculares** son aquellas que no poseen sistemas especializados en el transporte de sustancias, como ocurre con los musgos y las hepáticas. Debido a ello el transporte de agua y de sales minerales es realizado directamente por difusión a través de toda su superficie. Este proceso puede producirse gracias a que sus epitelios carecen de una cutícula impermeable que impida la entrada. Al interior, el transporte de sustancias tiene lugar por simple difusión de unas células a otras, y en ocasiones, por transporte activo (figura 5a).



1.4.2 Circulación en plantas vasculares

Estas plantas poseen sistemas vasculares que permiten el transporte de sustancias.

El sistema vascular que transporta el agua y los minerales desde las raíces hasta las hojas se conoce como **xilema** y el sistema de tubos que transporta el alimento fabricado durante la fotosíntesis desde las hojas hasta las distintas partes de la planta se llama **floema**. La especialización de cada tipo de conducto evita que las sustancias que se transportan por el floema y el xilema se mezclen. La circulación en plantas vasculares incluye procesos físicos con funciones muy específicas como la absorción de nutrientes, el transporte de la savia bruta, el transporte de la savia elaborada y la transpiración e intercambio de gases. Las plantas vasculares con semillas son abundantes en la mayoría de ecosistemas (figura 5b).

1.4.2.1 Absorción de agua en las plantas vasculares

La **raíz** absorbe continuamente el agua que las plantas necesitan para su nutrición. La región de la raíz en la que se absorbe el agua se llama **zona pilífera** (rica en pelos radicales) y está formada por células epiteliales con **pelos absorbentes**, cuyas paredes son delgadas, de consistencia mucilaginosa (de apariencia gelatinosa) y carecen de cutícula, lo que aumenta su capacidad de absorción de agua. El agua atraviesa la membrana y penetra en los pelos por ósmosis. Algunos factores como la temperatura, la aireación del suelo, la cantidad de agua y la capacidad de retención, afectan el proceso de absorción de agua.

Figura 5. Los musgos (a) son plantas no vasculares que tapizan el suelo de los bosques lluviosos. ¿Qué factores podrían limitar su crecimiento? ¿Tendrán alguna ventaja adaptativa frente a las plantas vasculares? Los helechos (b) son las plantas vasculares más sencillas.



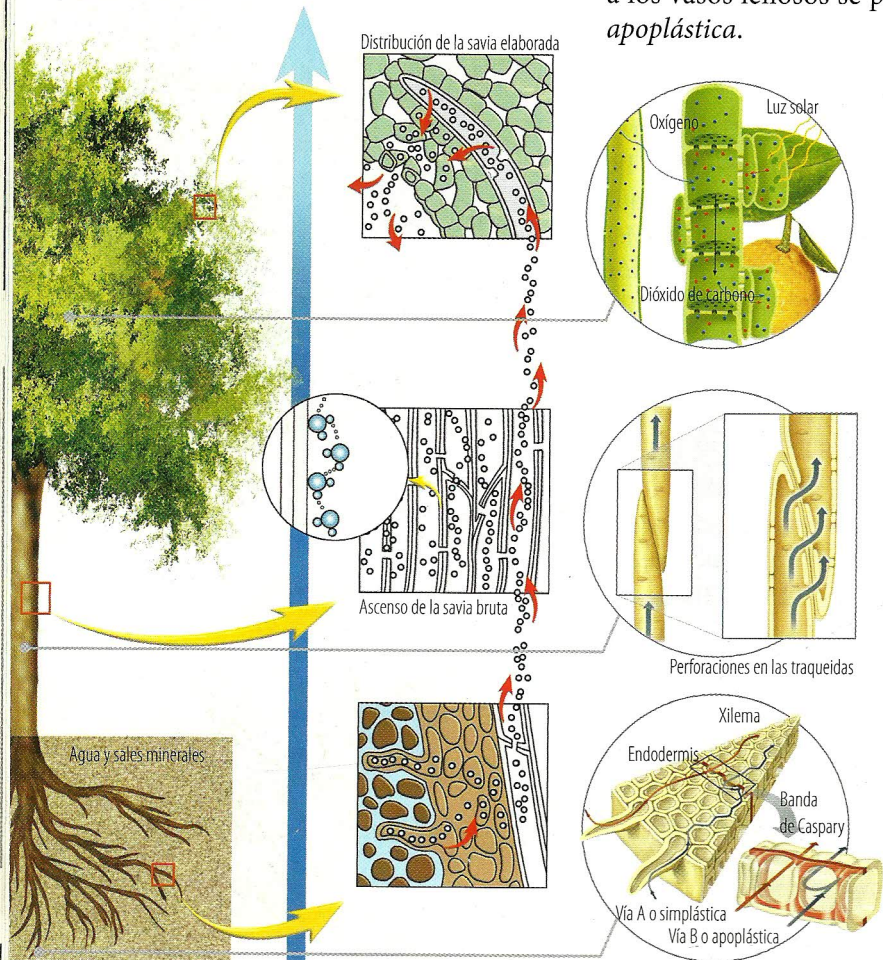
1.4.2.2 La absorción de minerales en las plantas vasculares

Las plantas solo pueden incorporar minerales en forma de iones (partículas cargadas eléctricamente) como potasio (K^+), sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}), calcio (Ca^{2+}), entre otros disueltos en agua. Este proceso se realiza mediante **transporte activo**, el cual requiere de la participación de enzimas transportadoras presentes en la membrana plasmática que introducen los iones en las células epidérmicas y en los pelos absorbentes. En muchos casos a través de la membrana se han observado, además, **canales iónicos** que facilitan el proceso. Existen también mecanismos de **difusión e intercambio iónico** sin gasto energético.

1.4.2.3 Transporte de la savia bruta

El agua y las sales minerales, al penetrar en las células epidérmicas, reciben el nombre de **savia bruta**. Esta circula en el interior de la raíz hacia el cilindro central del tallo en donde se encuentran los **vasos leñosos** que conforman el **tejido leñoso o xilema** (figura 6). Estos vasos están constituidos por células muertas, denominadas **traqueidas**. Estas son huecas, cilíndricas, con gruesas paredes reforzadas por una sustancia denominada **lignina** y cuyos tabiques de separación entre células han desaparecido o están perforados. La savia bruta asciende por el xilema y llega hasta las hojas, en donde parte del agua se utiliza en la fotosíntesis y otra parte se elimina por transpiración. El transporte hasta llegar a los vasos leñosos se puede realizar a través de dos vías: *simplástica* y *apoplástica*.

Figura 6. El transporte de sustancias en las plantas vasculares se realiza a través del xilema y del floema, los cuales forman un tejido estructural y funcionalmente complejo que se extiende por todo el cuerpo de la planta para facilitar el proceso de circulación.



- **Vía A o simplástica:** el agua y los solutos pasan a través de estructuras tubulares que conectan las paredes celulares y el citoplasma de las células adyacentes, conocidas como **plasmodesmos**. El flujo de agua ocurre mediante ósmosis y transporte activo.
- **Vía B o apoplástica:** el agua y los solutos pasan bordeando paredes celulares y espacios intercelulares mediante difusión simple.

En el transporte ascendente de savia bruta intervienen tres tipos de células presentes en el xilema: las *traqueidas*, los *elementos de los vasos* y las *fibras*. Estas células son capaces de transportar agua y minerales disueltos a muchos metros de altura, en contra de la fuerza de gravedad, en algunos casos, a más de cien metros de altura. Durante mucho tiempo se pensó que las plantas hacían esto empujando el agua desde las raíces; sin embargo, actualmente se sabe que la savia puede recorrer estas grandes alturas gracias a los mecanismos de *cohesión*, *tensión* y *presión radicular*.



1.4.2.4 El ascenso de la savia

El agua (H_2O) es una molécula relativamente sencilla compuesta por dos átomos de hidrógeno, que tienen carga positiva, y uno de oxígeno, que posee carga negativa. Debido a que las cargas de signos opuestos se atraen, el hidrógeno de una molécula de agua es atraído por el oxígeno de otra molécula, mediante puentes de hidrógeno. Este fenómeno se conoce con el nombre de **cohesión**.

De otra parte, cuando el agua asciende por los vasos conductores del xilema (traqueidas, elementos de los vasos y fibras), también se expone a otra fuerza llamada **adhesión**, que es la propiedad por la cual se unen las superficies de dos sustancias cuando entran en contacto, la cual se debe a las fuerzas entre las moléculas que interactúan. Como la fuerza de adhesión es mayor que la de cohesión, el agua asciende por el vaso. Este fenómeno se conoce como **capilaridad** (figura 7a).

La fuerza de adhesión-cohesión entre las moléculas de agua que se encuentran en el xilema es tan fuerte, que el agua se comporta como un "cable" que tiene una resistencia igual a la de un cable de acero del mismo grosor. Estas fuerzas de adhesión-cohesión hacen subir la savia bruta, por la gran tensión que pueden crear gracias a dos fenómenos: la **transpiración** y la **capilaridad**. A medida que el agua se evapora en las hojas por la **transpiración**, se genera una presión o tensión negativa y, en consecuencia, el agua asciende hacia las hojas, por los vasos del xilema. Esta tensión se transmite a lo largo del sistema vascular, desde el tallo hasta las raíces, haciendo que el agua se mueva como por un efecto de succión.

■ Fuerza de tensión y transpiración

En la transpiración de las plantas, la salida del agua genera una fuerza conocida como **tensión**, que es capaz de "halar" toda la columna de savia que viaja por el xilema. Entonces se impulsan las moléculas de agua que circulan a través del xilema hacia las células de las hojas y de ahí a la atmósfera. De la misma manera, la tensión se transmite a través de todo el tallo hacia las raíces, donde permite que el agua pase por ósmosis a través del suelo, hacia los tejidos de las raíces y de ahí, al xilema (figura 7b).

■ Presión radicular y ascenso de savia

Es la presión ejercida por mecanismos osmóticos originados por la continua entrada de agua en los pelos radicales, que empujan a las moléculas de agua a ascender. En condiciones normales, esta presión es muy pequeña, pero cuando las condiciones de transpiración son deficientes, la presión de la raíz puede tener importancia. Cuando se corta un árbol, se puede apreciar cómo se acumula agua en la superficie del tronco (figura 7c).

MISTERIO CIENTÍFICO

Las plantas controlan sus niveles de agua a través de la apertura y cierre de los estomas localizados en el envés de las hojas. Estudios recientes han determinado que existe un segundo mecanismo de regulación a través del xilema de las hojas. ¿Cómo ocurre? Primero, la membrana del xilema se contrae y se dilata de manera constante, ajustando la cantidad de agua y minerales que llegan a la hoja. Luego, bajo condiciones de sequedad, en las paredes del xilema se forman pequeños canales que comunican con los vasos mayores del xilema, para efectuar de este modo un transporte más fino del agua enriquecida con minerales.

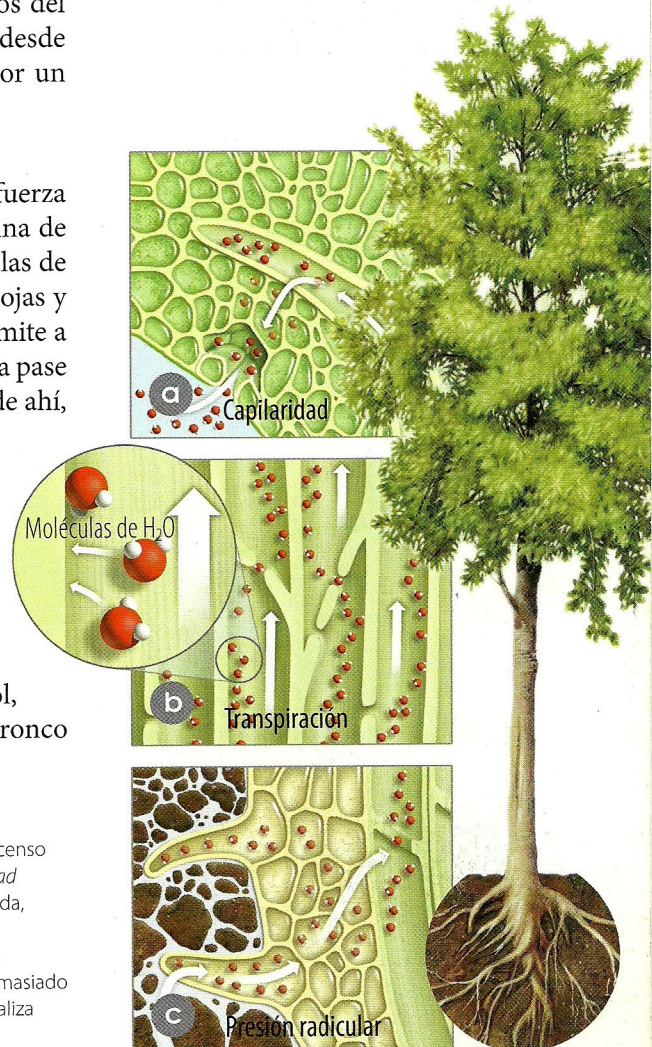


Figura 7. Las plantas regulan el ascenso del agua por medio de la *capilaridad* (a) y la *presión radicular* (c), y su salida, por medio de la *transpiración* (b).^{*} Estos procesos son fundamentales especialmente para los árboles demasiado altos en los que el transporte se realiza con un mínimo gasto de energía.



**MENTES
BRILLANTES**



En la imagen de la izquierda se muestra una planta completa y a la derecha, una planta a la que se le ha cortado el tallo y se le ha ajustado un tubo de cristal.

Interpreta

¿Qué pone de manifiesto esta experiencia con respecto a la savia y la presión radical en las plantas?

1.4.2.5 Transporte de la savia elaborada

Las moléculas orgánicas fabricadas por las plantas, principalmente glúcidos como la sacarosa, forman la **savia elaborada**. El transporte de estas sustancias, desde los tejidos productores a todas las partes de la planta, tiene lugar en los **vasos liberianos** o **tubos cribosos**, y en las células acompañantes del **floema**.

Los **vasos liberianos** son células vivas, alargadas, dispuestas unas a continuación de otras, y cuyos tabiques de separación o **placas cribosas** están perforadas por poros, lo que permite la circulación de savia de una célula a otra. Los glúcidos y demás componentes orgánicos producidos en el parénquima clorofílico de las hojas pasan por transporte activo a las células acompañantes del floema y, a través de los plasmodesmos, ingresan a los tubos cribosos. Se conocen actualmente dos mecanismos de transporte por el floema: un *mecanismo pasivo* y un *mecanismo activo*.

El **mecanismo pasivo** se basa en la teoría del **flujo de masa**. Según esta teoría una diferencia de presión hace que el flujo vaya desde donde hay más sacarosa, es decir, desde los órganos fotosintetizadores (hojas) hacia donde hay menos, o sea los demás órganos (frutos, raíces). El aumento de glúcidos en los tubos cribosos provoca la entrada de agua por ósmosis a los plasmodesmos. Como resultado de la entrada masiva de agua, se produce un empuje de la savia elaborada hacia los órganos consumidores, donde pasa, por transporte activo, desde los tubos cribosos hacia las células que la requieren (figura 8).

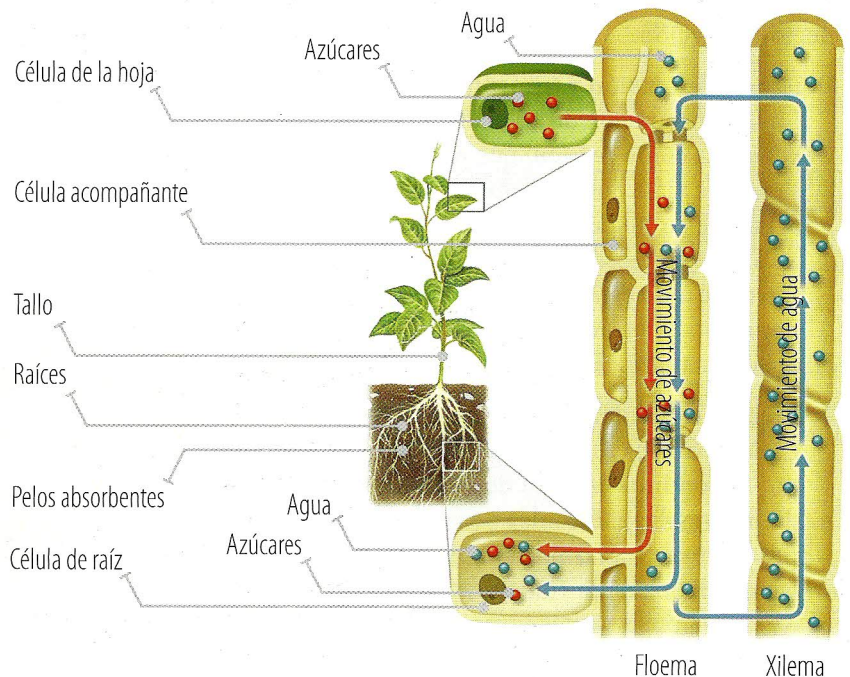
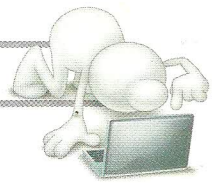


Figura 8. La teoría del flujo de masa explica el transporte de la savia elaborada.

El **mecanismo activo** se basa en la teoría de las **corrientes intracitoplasmáticas**. Esta plantea que muchos de los compuestos orgánicos pueden transportarse a través del citoplasma de los tubos cribosos con consumo de energía. El transporte de la savia elaborada es lento, ya que la luz de los vasos cribosos está interrumpida por las placas cribosas, cuyos huecos pueden taponarse y afectar así el transporte. Del mismo modo, algunos factores como la actividad metabólica, la temperatura, la luz y el oxígeno aumentan la intensidad del transporte.



1.4.2.6 Transpiración en las plantas

En las hojas de las plantas se realizan funciones vitales en las cuales son fundamentales los procesos de transpiración y el intercambio de gases. Como se mencionó anteriormente, la transpiración es la pérdida de agua por evaporación, que se produce en las hojas mediante **difusión simple**.

En la **epidermis foliar** se encuentran dispersos poros llamados **estomas** (figura 9). Son estructuras que se ponen en contacto con el exterior de la hoja y los espacios intercelulares del interior. A través de ellos se produce la mayor parte de la transpiración de la planta. Como se ve en la figura adjunta, los **estomas** están constituidos por dos células en forma de riñón, llamadas **oclusivas**, entre las que hay una abertura u **ostíolo**, que conecta con una **cámara subestomática**. Los estomas abren o cierran el ostíolo controlando, de este modo, la transpiración. La **velocidad de transpiración** está regulada por factores como la luz, el viento, la humedad relativa del aire y la temperatura.

La **luz** produce un incremento en la producción de azúcares producto de la fotosíntesis en las células oclusivas que poseen cloroplastos. La elevada concentración de azúcares provoca la entrada de agua en la célula por **ósmosis**, y por tanto, la apertura de los estomas durante el día. Por la noche los estomas se cierran al disminuir la concentración de azúcares. El **viento** facilita la eliminación de vapor de agua cercano a la hoja e incrementa la transpiración. La **humedad relativa del aire** es inversamente proporcional a la transpiración, de modo que si la humedad atmosférica es alta, la transpiración es menor. La **temperatura** es directamente proporcional a la transpiración. Las temperaturas elevadas aumentan la evaporación del agua, lo que en consecuencia, aumenta la transpiración.

1.4.2.7 Intercambio de gases

Las plantas intercambian dióxido de carbono y oxígeno con la atmósfera. Este intercambio se realiza principalmente, a través de los estomas. A la vez que se realiza el transporte de nutrientes, se realiza la incorporación del CO_2 presente en el aire. Este gas ingresa en la planta cuando los estomas se llenan de agua y se abren para que el dióxido de carbono pase por **difusión** a las cámaras subestomáticas ubicadas por debajo de cada estoma. Luego este gas se desplaza a los espacios intercelulares y entra en las células del parénquima de empalizada mediante **ósmosis**. Entonces se dirige hacia los cloroplastos, estructuras en las que se realiza la fotosíntesis. En este proceso se produce oxígeno, que es eliminado a través de los estomas. En los tallos de plantas de más de un año, el intercambio de gases se produce a través de las **lenticelas**, cavidades del tejido suberoso que comunican el parénquima interno con el exterior (figura 9).

Miniexperimento

OBSERVA PRODUCTOS EXCRETADOS POR LOS VEGETALES

Materiales
Una planta, una matera, un plástico.

Procedimiento

1. Coloca una planta pequeña, sembrada en matera en un lugar iluminado.
2. Cubre la planta con un plástico transparente.
3. Observa y registra el tiempo transcurrido hasta que suceda algún cambio.

Analiza

■ ¿Qué proceso se evidencia con este miniexperimento? Argumenta tu respuesta, explicando los mecanismos que hacen posible este proceso.



Figura 9. El agua que es absorbida del suelo por la raíz, circula hacia las hojas por la acción capilar, un efecto de succión conocido como *tensión de transpiración*. Una parte del agua absorbida se pierde a través de los estomas por transpiración.