

## C1 Quemamos azúcares – La respiración celular y la cadena respiratoria

Se trata de un experimento típico para abordar los temas del abastecimiento energético en el cuerpo humano, la respiración celular y la cadena respiratoria. Con tres experimentos parciales sencillos (quemar azúcares con y sin catalizador y la comprobación del agua y el dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>] en el aire que respiramos) se explica que también en el cuerpo humano se quema azúcar. Mediante la analogía de la catálisis heterogénea al quemar azúcar en el experimento y la combustión con catalizadores biológicos en el cuerpo se aborda el tema del metabolismo energético y la respiración celular en el cuerpo humano. En el grupo de edad hasta los 16 años alcanza una interpretación cualitativa de los resultados de la experimentación. Es conveniente que el profesor o la profesora ahonde en el tema en la clase para alumnos de 16 y más años, donde se supone que los alumnos cuentan con suficientes conocimientos previos. Los aparatos y materiales entregados son suficientes para que **ocho** grupos de alumnos realicen el experimento en paralelo.

### 1 Pregunta central

El azúcar (la sacarosa) pertenece a la categoría de sustancias de los hidratos de carbono y como tal al quemar se descompone en agua y dióxido de carbono. Pero, ¿cómo tiene lugar la “combustión” del azúcar en el cuerpo humano?, y ¿es verdaderamente el principal suministrador para el metabolismo humano? A partir de un experimento parcial sobre la combustión catalítica del azúcar así como otros dos experimentos parciales sobre las reacciones que permiten comprobar los productos de la respiración celular llegamos al metabolismo energético a nivel celular. Los alumnos y alumnas entienden los procesos de oxidación y descomposición en el cuerpo humano a nivel celular que sirven para la transformación energética de los nutrientes en trifosfato de adenosina (ATP). Los elementos de la nutrición, en particular, los hidratos de carbono y las grasas, se descomponen en tres reacciones de la respiración celular, a saber, la glucólisis o β-oxidación, el ciclo de ácido cítrico y la fosforilación oxidativa. Al reaccionar con el oxígeno se producen agua y dióxido de carbono, productos de bajo contenido energético. Las reacciones de comprobación muestran la presencia de estos dos productos resultantes de la descomposición y que son liberados al entorno al exhalar.

Sobre el bloque temático completo de la “digestión y el metabolismo energético del ser humano” también hay los experimentos C2 (Los hidratos de carbono como suministradores de energía del metabolismo – el almidón y el azúcar) y C3 (¿Cómo se descomponen las grasas en la digestión humana? – la saponificación del aceite comestible).

Los alumnos y alumnas aprenden de forma metódica cómo utilizar diferentes variables en la experimentación para derivar a partir de ahí la prueba exacta de la presencia de una sustancia.

### 2 Integrar el experimento en el contexto educativo

#### 2.1 Base científica

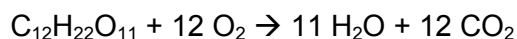
Estos experimentos parciales sobre el tema de la salud permiten abordar el bloque temático de la nutrición, la respiración, el transporte de sustancias y la transformación energética. En el marco de la enseñanza hay que hacer especial hincapié en que los alumnos y alumnas relacionen los diferentes ámbitos temáticos entre sí. ¿Qué tienen que ver la respiración y la circulación con la alimentación? El vínculo que existe entre la absorción, el transporte y la eliminación de materia y energía son temas que deberían abordarse explícitamente.

Los procesos oxidativos que tienen lugar en una célula son difícilmente imaginables para los alumnos y alumnas menores, dado que no son visibles y sólo se pueden percibir de forma indirecta por el calor que se siente en el cuerpo, p. ej., al realizar un ejercicio físico. Además, los niños no comprenden fácilmente la transformación de materia a nivel de las partículas; se imaginan que los átomos son triturados por los dientes, en el intestino se digieren y en los pulmones se “destruyen”. Para entender los procesos metabólicos que tienen lugar en una célula, en particular, la cadena respiratoria a nivel molecular, al menos deberían conocer las fórmulas de las reacciones y los procesos de combustión, a fin de que se puedan tratar de forma cualitativa. Para profundizar en el tema es necesario tener conocimientos de las reacciones redox (de reducción y oxidación).

Para entender la reacción ácida del dióxido de carbono en el agua se requieren conocimientos básicos de ácidos y bases.

### 2.1.1 Planteamiento cualitativo en el grupo de edad de 10 a 16 años

El azúcar de caña (la sacarosa) al quemarse con oxígeno se transforma en agua y dióxido de carbono. En teoría, esto lo podemos verificar mediante la siguiente fórmula de la reacción:

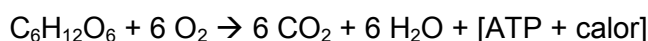
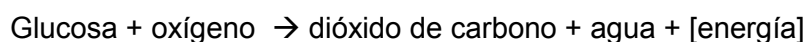


No obstante, en el experimento parcial 1 vemos que quemar azúcar en la práctica no es tan fácil: Se necesita un catalizador. Algo parecido sucede en el cuerpo humano. La glucosa, uno de los azúcares que aportan la mayor cantidad de energía (entre otros, se trata de un producto de transformación de la sacarosa), sólo libera su energía en el cuerpo humano a través de una compleja cadena de reacciones químicas. Estas son catalizadas por enzimas (enzima = catalizador biológico).

En nuestro segundo experimento parcial lo comprobaremos en base a la respiración celular. La respiración celular une los procesos de la alimentación y la digestión con el cambio de gases. La sangre es la encargada de transportar las sustancias de base para la respiración celular. Lleva a los tejidos del cuerpo el oxígeno así como los compuestos energéticos (p. ej. los hidratos de carbono, la glucosa y las grasas) que se forman en la boca, el estómago y el intestino por la descomposición mecánica y enzimática. Los compuestos energéticos y el oxígeno pasan de la sangre a las células de los tejidos y provocan una compleja serie de reacciones con los compuestos de bajo contenido energético agua y dióxido de carbono. De esta manera, los compuestos energéticos son “oxidados” (o “quemados”) por el oxígeno. La energía reactiva se utiliza para crear un gradiente electroquímico y posteriormente para la síntesis de trifosfato de adenosina (ATP).

Como alternativa se pueden oxidar también ácidos grasos con oxígeno.

Para la oxidación de compuestos de alto contenido energético con el ejemplo de la glucosa se puede hacer la siguiente fórmula reactiva:



### 2.1.2 Explicación detallada de los procesos para el grupo de edad 16+

Los procesos metabólicos de la oxidación de compuestos de alto contenido energético tienen lugar en diferentes partes de la célula:

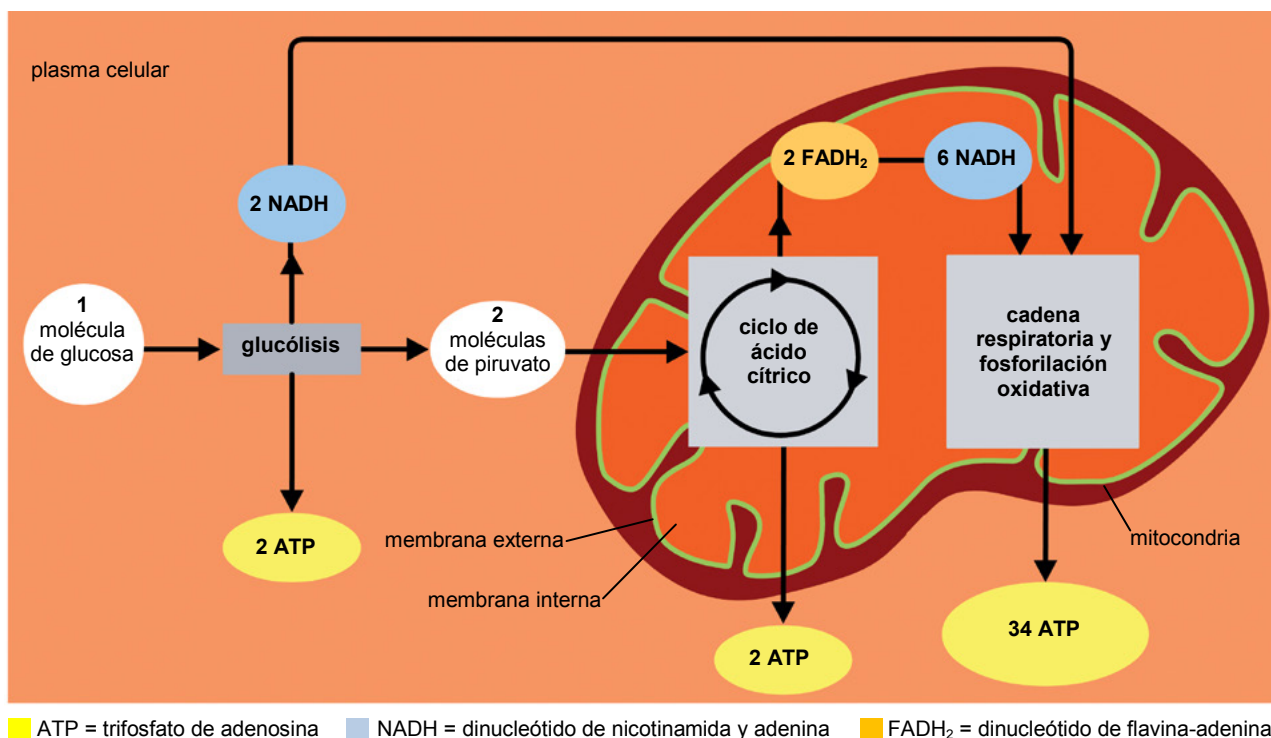
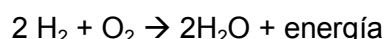


Fig. 1: Visión general de la respiración celular.

En la **glucólisis** se transforma el esqueleto del carbono de una molécula de glucosa con seis átomos de carbono en dos moléculas con tres átomos de carbono; el nuevo compuesto se llama piruvato. La glucólisis tiene lugar en el citoplasma celular.

El piruvato es transportado en las mitocondrias. Para preparar el **ciclo del ácido cítrico** se reduce el esqueleto de carbono del piruvato de tres a dos átomos de carbono y se une a la coenzima A. A partir de ahí se forma la acetil coenzima A (ácido acético activado). En este proceso se producen dióxido de carbono e hidrógeno. El hidrógeno pasa a la coenzima NAD<sup>+</sup> (el dinucleótido de nicotinamida y adenina), creando NADH+H<sup>+</sup>. En el ciclo de ácido cítrico el esqueleto de carbono restante con dos átomos de carbono se oxida por el oxígeno en la acetil coenzima A. Como resultado de ello se desprenden hidrógeno y dióxido de carbono, el hidrógeno se traspasa nuevamente a la coenzima NAD<sup>+</sup>. El NADH+H<sup>+</sup> es oxidado en la membrana interna de la mitocondria con el oxígeno del aire aspirado.



La reacción corresponde formalmente a la reacción explosiva del gas oxhídrico y libera grandes cantidades de energía. A fin de que las células no se dañen, esta reacción redox tiene lugar a través de la **cadena respiratoria**. Mediante varios complejos proteicos conectados uno tras otro en la membrana interna de la mitocondria se traspasan los electrones entre los complejos. De esta forma sólo se libera una parte de la energía reactiva total. El último complejo proteico de la cadena respiratoria traspasa los electrones conjuntamente con protones (iones H<sup>+</sup>) de la matriz de la mitocondria al oxígeno. En este proceso se produce agua como producto final de la cadena respiratoria.

La energía reactiva se aprovecha en los complejos proteicos de la cadena respiratoria para obtener protones del interior de la mitocondria y llevarlos a la fisura entre las dos membranas de la mitocondria. De esta forma se produce un gradiente de protones sobre la membrana interior de la mitocondria que sirve para almacenar la energía provisionalmente. Si los protones fluyen a lo largo de su gradiente desde la fisura entre las dos membranas de la mitocondria por la enzima ATP sintasa volviendo a la matriz de la mitocondria se aprovecha la energía liberada para la formación de ATP.

Conclusión: El dióxido de carbono y el agua son producidos en la reacción en dos procesos metabólicos diferentes. Mientras que el dióxido de carbono se forma ya en el ciclo del ácido cítrico, el agua sólo aparece al final de la cadena respiratoria. En las reacciones en las mitocondrias se produce  $\text{NADH}+\text{H}^+$  aparte de la coenzima reducida, cuya oxidación con oxígeno suministra la energía para la síntesis del trifosfato de adenosina ATP.

## 2.2 Relevancia en el plan de estudios

En el grupo de edad de los 12 a los 16 años se tratan los temas de anatomía y los procesos fisiológicos que tienen lugar a nivel orgánico durante la alimentación, la digestión y la respiración. A partir del grupo de 16+ se abordan, en general, los procesos fisiológicos del metabolismo a nivel celular, apoyándose en los conocimientos previos de química general y orgánica.

Sin embargo, las reacciones en las que se verifica la presencia de los productos eliminados por el metabolismo pueden servir de experimentos cualitativos a partir del grupo de edad 10+. Aquí es recomendable activar los conocimientos previos relativos a los procesos sencillos de combustión (la vela, la combustión de azúcar con y sin catalizador).

Los procesos de combustión pueden ser examinados desde una perspectiva química. La oxidación y reducción deberían abordarse como la transferencia de los electrones, para poder entender su aplicación a nivel de la respiración celular. Los aspectos multidisciplinarios están dados de esta manera por la oxidación y la reducción en el contexto biológico de la respiración celular.

**Temas y terminología:** La cadena respiratoria, el trifosfato de adenosina ATP, el catalizador biológico, el ciclo del ácido cítrico, el citoplasma, el suministrador de energía, la enzima, la grasa, la glucólisis (la oxidación  $\beta$ ), la catálisis, la reacción explosiva con gas oxhídrico, los hidratos de carbono, el dióxido de carbono, las mitocondrias, el dinucleótido de nicotinamida y adenina NAD, la fosforilación oxidativa, el valor pH, los protones, el piruvato, la reacción redox, el oxígeno, la reacción ácido-base, el transporte de sustancias, el metabolismo, el proceso de combustión, el agua, la respiración celular, el ciclo de ácido cítrico, el azúcar

## 2.3 Conocimientos a adquirir

Los alumnos y alumnas ...

- pueden transferir el principio de la combustión del azúcar a los procesos del metabolismo.
- entienden las células como sistema en el que interactúan diferentes procesos metabólicos.
- pueden captar principios básicos de la transformación de la energía por el catabolismo.
- pueden explicar en términos generales cómo funciona la respiración celular y elaborar la fórmula básica.
- pueden explicar la relación que existe entre el intercambio de gases en el pulmón y la respiración celular.
- pueden planificar efectivamente, realizar y evaluar experimentos adecuados desde un punto de vista cualitativo para probar la presencia de productos metabólicos.

## 2.4 El experimento en el contexto explicativo

### 2.4.1 Experimento parcial 1: Es posible quemar el azúcar

El experimento parcial sirve para activar conocimientos previos sobre procesos de combustión. Además, ilustra las especificidades de la combustión de azúcares. El azúcar no se inflama ni arde espontáneamente. Los alumnos y alumnas intentan primero prender un poco de azúcar sin éxito. Después prenden en el recipiente de una velita de té un terrón de azúcar sobre el que echaron antes algo de ceniza de papel. Se sostiene durante algunos segundos un tubo de ensayo sobre la llama. Observamos: que para quemar azúcar se requiere un catalizador. En la combustión se desprende visiblemente vapor de agua que se condensa en la pared fría del vidrio.

**Observación sobre la combustión del azúcar:** La combustión del azúcar se demostró con éxito con la ceniza de diferentes tipos de papel. A pesar de ello en algunos casos no se tiene éxito si no se siguen las instrucciones de experimentación al pie de la letra. Por este motivo, pida a los alumnos y alumnas que trabajen con precisión. (Quizás debería intentar hacer Ud. mismo el experimento de antemano, antes de que lo realicen los alumnos y alumnas). Para quemar el azúcar no es conveniente usar fósforos. El experimento sólo funciona si se utiliza un encendedor de barra con una llama caliente y dirigida. Un consejo: en caso de que no funcione el experimento con ceniza de papel, pruebe con ceniza de cigarrillo, este método siempre sale bien.

**Explicación de fondo:** Sobre el efecto de la ceniza hay diferentes explicaciones falsas como, p. ej., la del “efecto de la mecha”. Sin embargo, dado que no se quema el azúcar líquido sino los gases de desintegración del azúcar, esta explicación es sin lugar a dudas incorrecta. La explicación correcta es la del efecto catalizador de la ceniza. En internet y en la bibliografía hay al respecto una explicación en el sentido de que la ceniza del cigarrillo contiene hierro u óxido férrico que hace las veces de catalizador. Sin embargo, los experimentos con hierro y óxido férrico no permitieron confirmar esta hipótesis. Otra propuesta consiste en utilizar dióxido de manganeso ( $MnO_2$ ) en vez de ceniza. Pero el dióxido de manganeso más bien hace el efecto de sustancia de oxidación con oxígeno y no como catalizador. ¿Qué hay entonces en la ceniza de papel o del cigarrillo que funciona? Desde luego que no se trata de dióxido de manganeso. Además, el utilizar carbón activo en vez de ceniza es cuestionable desde un punto de vista didáctico. El carbón activo podría actuar en primer lugar como catalizador heterogéneo. El oxígeno del aire es adsorbido en el carbón activado y transfiere el oxígeno directamente a las moléculas de azúcar. Pero sólo hasta que el carbón activado se haya quemado. La explicación más probable es la siguiente: Los óxidos alcalinos contenidos en muchas cenizas actúan como catalizadores homogéneos para la descomposición hidrolítica del azúcar a temperaturas más elevadas. Los fragmentos que poseen un peso molecular bajo forman ahora gases inflamables que se mezclan con el oxígeno del aire y hacen posible que la llama siga encendida de forma autónoma. Dado que la ceniza del tabaco contiene más óxidos alcalinos que la ceniza del papel funciona especialmente bien.

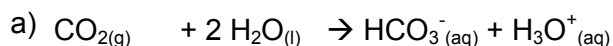
### 2.4.2 Experimento parcial 2: Prueba de los productos reactivos en el aire que respiramos: Sustancia A (agua)

El tubo de ensayo empañado indica la presencia de vapor de agua condensado que se encuentra en el aire expirado. Aquí se puede anudar directamente con lo observado en el experimento parcial 1.

### 2.4.3 Experimento parcial 3: Prueba de los productos reactivos en el aire que respiramos: Sustancia B (dióxido de carbono)

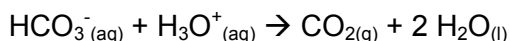
En este experimento parcial se varía sistemáticamente el contenido de dióxido de carbono de la solución en los tres tipos de experimento.

Por un lado, el dióxido de carbono se disuelve físicamente en agua, pero por otro lado reacciona en una reacción ácido-base con el agua, desprendiendo anión carbonato ácido ( $\text{HCO}_3^-$ ) o carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) así como iones de oxonio ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ):



Fórmula de la reacción 1: El equilibrio ácido-base del dióxido de carbono, reacción de ida.

Los iones de oxonio formados se pueden comprobar midiendo el valor pH con el papel tornasol o con otro indicador de pH; la solución tiene una reacción ligeramente ácida, el equilibrio está del lado de las sustancias resultantes. Al dióxido de carbono se le añaden, p. ej., sales minerales. Esto tiene básicamente dos razones: El agua permanece durante más tiempo fresca debido al efecto ligeramente conservante y el efecto percibido de saciar la sed es mayor. El gas se puede producir en caso dado también mediante natrón (bicarbonato de sodio,  $\text{NaHCO}_3$ ) y ácido acético ( $\text{CH}_3\text{-COOH}$ ). En esta reacción se produce la reacción de vuelta de la del punto 2.4.3 a), de forma que se desprende dióxido de carbono de la solución:



Fórmula de la reacción 2: El equilibrio ácido-base del dióxido de carbono, reacción de vuelta del punto 2.4.3 a).

En la respiración celular también se forma dióxido de carbono que se expulsa al entorno al exhalar. Si se introduce el aire exhalado en agua se produce nuevamente una reacción según la fórmula del punto 2.4.3 a). Esta solución reacciona por ello también de forma ligeramente ácida. La referencia para el punto neutral lo representa en este experimento la prueba con agua pura.

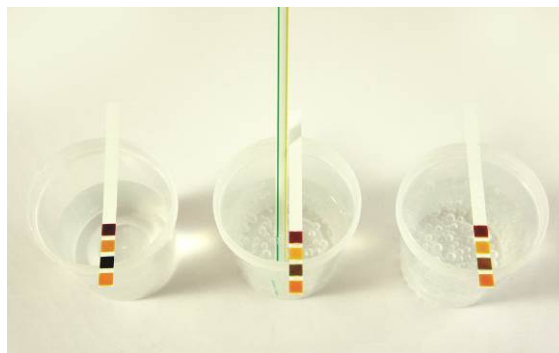


Fig. 2: Si se realiza correctamente, a diferencia del agua pura (a la izquierda) se observa en las pruebas con ácido carbónico (en el medio del aire de respiración, a la derecha agua mineral) una disminución del valor pH en la coloración del color verde.

La reacción ácida del dióxido de carbono en una solución acuosa se puede transferir de forma didácticamente simplificada al transporte de dióxido de carbono en la sangre. Aproximadamente el 10% del dióxido de carbono producido en la respiración celular se disuelve físicamente en el plasma sanguíneo. La mayor parte del dióxido de carbono hidratado se difunde en los glóbulos rojos y reacciona allí por catalización enzimática según la fórmula reactiva del punto 2.4.3 a) desprendiendo bicarbonato y protones. El bicarbonato en parte pasa de los glóbulos rojos al plasma sanguíneo y disuelto es transportado al pulmón. Los protones se ligan a diferentes proteínas de la sangre, de forma que el valor pH de la sangre permanezca en gran medida constante (es la función amortiguadora de la sangre). En el pulmón se vuelve a ceder el dióxido de carbono de todas las formas de transporte.

## 2.5 Variantes de ejecución

Los experimentos sobre la combustión así como los productos del metabolismo requieren poco material o tiempo y pueden ser integrados como experimentos de demostración o para los alumnos de forma individual o trabajando de a dos. Debido a la complejidad de la temática es conveniente aplicar diferentes métodos didácticos para motivar a los alumnos, que junto al planteamiento experimental tienen otros materiales a modo de información de fondo. Este tipo de trabajos pueden consistir, p. ej., en aprender por etapas o realizar el *puzzle* o rompecabezas de grupo. Estos métodos son adecuados, asimismo, para poder tener en cuenta el ritmo individual de aprendizaje y avance de los alumnos y alumnas.

## 3 Informaciones adicionales sobre el experimento

Para preparar y/o profundizar este experimento encontrará información complementaria en el Portal de Medios de la Siemens Stiftung:

<https://medienportal.siemens-stiftung.org>

Sugerencia de fondo:

Una visión general organizativa del tema alimentación, respiración, transporte de sustancias y transformación de la energía con una lista de los experimentos en forma de mapa mental o *mind map* (también puede encomendarse que esto lo preparen los alumnos y alumnas al comienzo de la unidad lectiva)

Sugerencia metodológica:

Materiales adicionales para el trabajo por estaciones, p. ej., dominós didácticos, hojas informativas y proyectos de investigación, modelos, simulación de la cadena respiratoria y la síntesis del ATP con tareas didácticas.

## 4 Observaciones sobre la realización del experimento

### 4.1 Lugar en el que se realiza el experimento

Los alumnos y alumnas pueden realizar de forma autónoma los experimentos bajo la vigilancia del profesor o de la profesora en un aula de clase bien ventilada.

### 4.2 Tiempo necesario

	Preparación	Realización	Evaluación y debate
Experimento parcial 1	3 min.	3 – 5 min.	aprox. 15 min.
Experimento parcial 2	2 min.	2 min.	aprox. 15 min.
Experimento parcial 3	5 min.	10 min.	aprox. 15 min.

### 4.3 Advertencias de seguridad

Los experimentos sólo pueden ser realizados bajo la vigilancia del profesor o de la profesora. Hay que advertir a los alumnos y alumnas que los materiales suministrados sólo se deben utilizar siguiendo las instrucciones correspondientes.

En estos experimentos tenga en cuenta los siguientes peligros y llame la atención de los alumnos y alumnas a este respecto:

- Hay peligro de quemaduras y de incendio al trabajar con fuego. Antes de utilizar por primera vez los encendedores el profesor o la profesora tiene que controlar que funcionen bien, especialmente para regular la altura de la llama.
- ¡Prohíba que los alumnos y alumnas jueguen con el fuego! En los experimentos parciales 1 y 3 se puede utilizar un recipiente de aluminio como base refractaria.
- Los comestibles suministrados no son adecuados para el consumo humano.

#### 4.4 Aparatos y materiales

##### A adquirir o preparar previamente:

- agua de la llave (un valor pH de aprox. 7,0 – 7,5 es adecuado)
- si hace falta, agua destilada
- si hace falta, agua mineral
- un poco de papel
- Para el experimento parcial 1: por grupo de alumnos un encendedor (de ser posible un encendedor de barra). Por favor no usen nunca fósforos en vez de un encendedor, porque si no el experimento no funciona.

##### Incluido en el suministro:

Los aparatos y materiales entregados son suficientes para que **ocho** grupos de alumnos realicen el experimento en paralelo.

Los materiales y aparatos importantes para la seguridad deben ser controlados antes de entregárselos a los alumnos y alumnas para comprobar que funcionen correctamente.

Para **un** grupo de alumnos se requieren los siguientes materiales de la caja:

material	cantidad
azúcar en terrones, paquete	1 terrón de azúcar por grupo
barrita de medición del pH, paquete	1 paquete para toda la clase
clip para plantas (para fijar el tubo de ensayo)	1x
pajilla	1x
recipiente de aluminio	1x
tubo de ensayo de vidrio, 13 cm	1x
vaso de plástico, 100 ml	3x
velita de té o recipiente de velita de té	1x





Fig. 3: Aparatos y materiales incluidos en el suministro para un grupo de alumnos.

#### 4.5 Poner orden, eliminar residuos, reciclar

Todos los aparatos y casi todos los materiales suministrados en la caja se pueden reutilizar. Por ello debería asegurarse de que al concluir cada experimento coloquen todo nuevamente en la caja correspondiente. Así estará seguro de que Ud. y sus compañeros de trabajo encuentren todo rápidamente cuando lo quieran volver a utilizar.

Los aparatos que se hayan ensuciado al realizar los experimentos, como, p. ej., vasos, recipientes, cucharas, tubos de ensayo, deberían ser limpiados antes de colocarlos en las cajas. Lo más fácil es que los alumnos y alumnas se ocupen de hacerlo al finalizar el experimento.

Además, asegúrese de que los aparatos estén listos para ser utilizados en la próxima ocasión.

Por ejemplo, hay que poner a cargar las pilas usadas (También es recomendable cuando no se han usado las pilas desde hace tiempo).

Los materiales no reciclables como, p. ej., los palitos de medición del valor pH o el papel de filtro, deben ser tirados a la basura correcta.

Los residuos resultantes de este experimento se pueden tirar a la basura normal o por el desagüe.