

QUÍMICA, INDUSTRIA Y SOCIEDAD

JOSÉ LUIS SOTELO SANCHO
Real Academia de Ciencias

La química, una de las ciencias naturales que trata del conocimiento de las sustancias y de sus transformaciones, posee una proyección aplicada que se refleja en una poderosa industria y que tiene, asimismo, una fuerte incidencia en la sociedad.

El campo de actuación de la química es inmenso: abarca todas las transformaciones naturales, que incluyen los fenómenos vitales (bioquímica) y también muchos procesos que se dan en la materia inanimada que constituyen las rocas y los minerales (geoquímica), así como las transformaciones químicas «artificiales», provocadas por el ser humano.

El hombre tiene en común con animales y plantas las complejas transformaciones que de modo espontáneo son responsables de la vida; pero se diferencia de ellos en su carácter racional, que le faculta para tomar decisiones voluntarias, como inventar o idear nuevas herramientas, procesos o productos que satisfagan mejor sus necesidades primarias (alimento, vestido, vivienda), y también para generar otras necesidades secundarias que le proporcionan mayor bienestar o satisfacción (transporte, entretenimiento).

De este modo, sintetizando muchos siglos en unos segundos, han surgido la agricultura, los metales, las herramientas, los medios de transporte y las máquinas, etapas que cristalizan a fines del siglo XVIII en la Revolución Industrial y a lo largo del siglo XIX en un crecimiento de la industria, primero del carbón y del acero, para producir máquinas, herramientas y medios de transporte (ferrocarril y barcos), y posteriormente para la obtención de productos químicos (colorantes artificiales) y energéticos (gas del alumbrado, petróleo).

El conocimiento y dominio de la naturaleza a través de la ciencia ha servido de base para el nacimiento de todas estas tecnologías. Así, Bertrand Russell afirma que, en la práctica, todo lo que distingue al mundo moderno de las épocas pretéritas es atribuible a la ciencia.

El crecimiento exponencial del conocimiento en los dos últimos siglos ha permitido un mayor dominio de las enfermedades y un incremento sustancial de la esperanza de vida. Como consecuencia, la población ha aumentado, y

con ella el consumo de materias primas y energía, y la generación de residuos, lo que ha dado origen a un nuevo tipo de problemas relacionados con nuestro entorno.

Curiosamente, este crecimiento afecta a una parte reducida de la población mundial, principalmente ubicada en los países desarrollados. Simultáneamente, grandes masas de dicha población aspiran tan sólo a resolver sus necesidades primarias: como ejemplo baste señalar que entre el 25 y el 30 % de la población mundial (1 500-2 000 millones de personas) no posee una vivienda adecuada por falta de materiales, no dispone de sistemas apropiados de saneamiento o carece de electricidad, o que 25 000 niños mueren cada día por falta de agua potable.

La industria química se ha desarrollado ampliamente a lo largo del siglo XX, basada sobre todo en el petróleo y el gas natural como materias primas, y ha proporcionado multitud de nuevos productos de consumo, aunque también ha sido causa de algunos accidentes y problemas medioambientales.

Quizá por este último motivo, la palabra «química» se utiliza hoy ampliamente, a veces de forma errónea, y en la mayoría de los casos con carácter peyorativo; así, se dice que los vinos o los alimentos tienen mucha química. Sólo en algún caso aislado tiene connotaciones positivas, como cuando, para manifestar una simpatía entre dos personas, se afirma que «hay buena química entre ellas».

Aunque la crítica y el escepticismo deben aceptarse siempre, con frecuencia la ciencia y la tecnología se juzgan de acuerdo con lo que casi se puede considerar una característica del ser humano: tender a reconocer y recordar lo malo e ignorar lo beneficioso. Es aplicable aquí lo que Shakespeare pone en boca de Antonio en la tragedia *Julio César*: «El mal que hace el hombre pervive después de él; sus buenas obras se entierran con sus huesos».

Como resumen, la química, como ciencia aplicada desarrollada por el hombre, se sitúa en un complejo territorio en el que intervienen múltiples actores (figura 1): los descubrimientos científicos, las empresas y los agentes económicos, la administración, los recursos naturales y el medio ambiente, que pretenden satisfacer tanto las necesidades primarias de la sociedad como otras secundarias, no tan

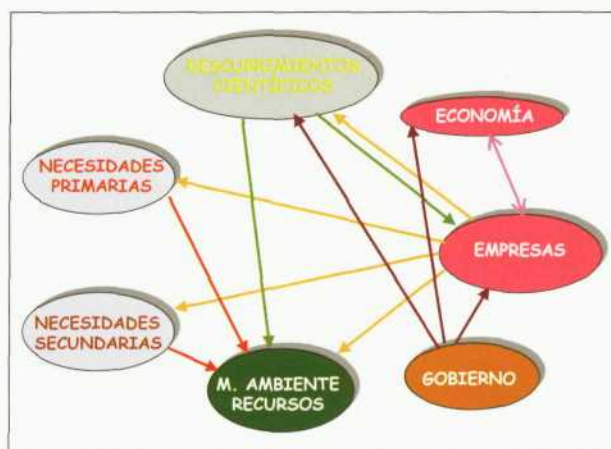


Fig. 1.- Interacciones entre la ciencia, la industria y los agentes sociales para satisfacer necesidades primarias y secundarias, e incidencia sobre el medio ambiente.

imprescindibles para la vida, y entre los que se establece una complicada red de interacciones.

Utilizando como ejemplo algunos grupos de compuestos, como los polímeros o el cloro y sus derivados (plaguicidas, clorofluorocarburos), se tratará de mostrar las aportaciones y problemas generados por la química creada por el hombre, su relación en el complejo sistema mencionado, y las soluciones que pueden darse a dichos problemas.

LOS POLÍMEROS ARTIFICIALES

Varios polímeros naturales, como la celulosa, la lana y el caucho, han sido ampliamente utilizados por el hombre con diversas finalidades, entre otras la obtención de fibras para vestido (algodón, lana), la fabricación de papel o, ya en el siglo XX, la manufactura de neumáticos para los automóviles. La utilización de estas materias naturales ha estado siempre condicionada a la disponibilidad de plantas y animales, y en algunos casos, como el caucho, a la ubicación geográfica de los cultivos. El desarrollo de la industria petroquímica (obtención de productos químicos

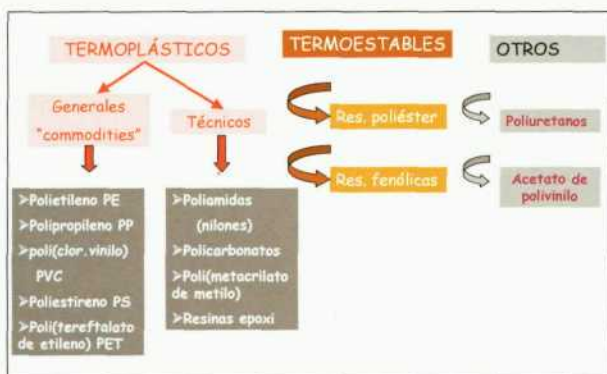


Fig. 2.- Tipos de plásticos.

a partir de las fracciones del petróleo) y la proximidad de la Segunda Guerra Mundial propiciaron la investigación para obtener polímeros artificiales sustitutivos de los naturales y no dependientes de factores climáticos, agrícolas o geográficos.

Así se desarrollaron el nailon 66 (descubierto por Carothers en 1935) y el poliéster (1939), para la obtención de fibras artificiales; el polietileno de baja densidad (Imperial Chemical Industries, 1939), empleado para láminas, aislamientos eléctricos, etc., y el caucho artificial -polibutadieno y poli(butadieno-estireno)-, fabricado en los años treinta en Alemania. Después de la Segunda Guerra Mundial, la producción de polímeros artificiales ha crecido sin cesar, tanto en volumen como en tipos diferentes. En la figura 2 se muestran algunos de los plásticos más utilizados hoy día, clasificados en termoplásticos, o plásticos que se ablandan al elevarse la temperatura, permi-



Fig. 3.- Distribución del consumo de plásticos de uso general en España.

tiendo así un moldeo por presión, termoestables y otros tipos. Dentro de los primeros, que son los más consumidos, se distingue a su vez entre los denominados plásticos de uso general (*commodities*) y plásticos técnicos, de menor producción, uso más específico y mayor valor añadido.

El uso de los materiales plásticos se ha extendido en el mundo desarrollado. En la figura 3 se muestra el consumo de plásticos *per cápita* en varios países en 1997, apreciándose una relación directa con el grado de desarrollo, que puede medirse por el PIB *per cápita*, también indicado en la figura. En la figura 4 se representa el consumo porcentual de los plásticos de uso general en nuestro país, prácticamente coincidente con la media europea, siendo el polietileno el más consumido (44%) seguido por el polipropileno y el policloruro de vinilo.

En su conjunto, la fabricación de plásticos consume un 4% del petróleo total refinado (el conjunto de productos petroquímicos supone alrededor del 7% del mismo, destinándose el 93% restante en su mayor parte a combustibles).

El uso de materiales plásticos presenta ventajas e inconvenientes. Sus ventajas, entre las que puede citarse que son materiales ligeros, fácilmente moldeables, resistentes a la degradación y económicos, quedan diluidas por el uso generalizado de estos materiales, que se ha convertido ya en rutinario. Así ocurre, por ejemplo, con los recubrimientos de los conductores eléctricos, que aprovechan el carácter aislante de la mayor parte de los polímeros. Por otra parte, los plásticos han sustituido ventajosamente como materiales estructurales a los metales, más densos, en muchas de sus aplicaciones. En el caso de la industria automovilística, se estima que la sustitución de piezas metálicas por materiales plásticos más ligeros ha supuesto en Europa un ahorro de más de 8 Mt/año de combustible.

A causa de su estructura macromolecular, los plásticos son bastante estables e inertes desde el punto de vista químico. Buena parte de sus inconvenientes derivan precisamente de su resistencia a la degradación, que hace que sus residuos se mantengan inalterados durante mucho tiempo después de finalizar su vida útil. Otro aspecto negativo es el fuerte impacto visual de los plásticos, motivado por su baja densidad y la forma de algunos productos finales (láminas, bolsas, etc.), aspecto muy valorado por la población. Otros factores adversos son más específicos de ciertos tipos de plástico, como el poli(cloruro de vinilo), PVC, que debido a su alto contenido en cloro ha sido objeto de múltiples controversias, o se deben a la presencia de metales pesados utilizados como cargas.

El creciente consumo de plásticos ha originado el problema del tratamiento de sus residuos, al que la ciencia y la tecnología tratan de dar solución. Como ocurre con muchos otros residuos sólidos, en pocos años se ha pasado de su simple vertido en zonas más o menos controladas del entorno a la aplicación de un sistema complejo de gestión que pretende minimizar la producción neta de residuos a verter al ambiente mediante la aplicación jerárquica de varios procedimientos; éstos persiguen, en primer lugar, la *reducción* en origen de los residuos y, a continuación, la *reutilización* de los materiales usados con la misma finalidad para la que fueron fabricados, el *reciclado* de dichos materiales, bien para obtener los productos de partida para su fabricación (los monómeros en el caso de los plásticos), bien para lograr otros productos de base para la industria petroquímica, o la *recuperación de energía* mediante sistemas de combustión en condiciones controladas. De forma general, los tres últimos métodos constituyen formas de *valorizar* los residuos, recuperando parte de su valor y eliminándolos como tales residuos.

Los países desarrollados favorecen por distintas vías la implantación de estos métodos de tratamiento, pero su aplicación es aún reducida. En 1994 se consumieron en Europa 29 Mt de plásticos que dieron lugar a 17.5 Mt de residuos. De ellos tan sólo se reciclaron 1.5 Mt. En 1996, los países de la Unión Europea sometieron a procesos de valorización alrededor del 25% de los residuos plásticos (10% a reciclado y 15% a recuperación de energía), disponiéndose el resto en vertederos. Varias causas son

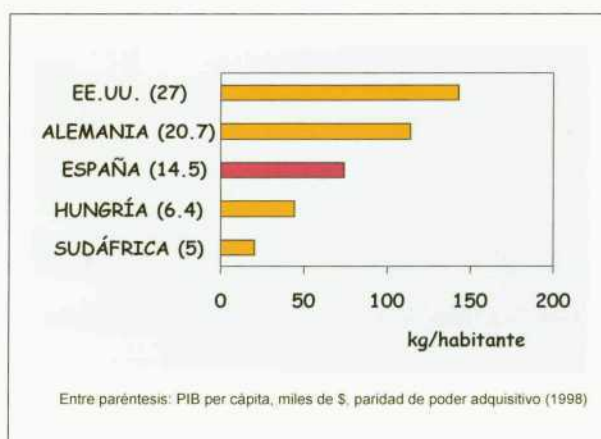


Fig. 4.— Consumo de plásticos por habitante en diversos países.

responsables de ello, principalmente la diversidad de tipos de plástico que aparecen mezclados en los residuos sólidos urbanos, lo que hace preciso llevar a cabo una segregación antes de proceder a su reciclado o reutilización, así como su baja densidad y elevada dispersión, que obliga a unos costes elevados de recolección y transporte.

Un ejemplo reciente de nuevas tecnologías basadas en los descubrimientos de la química: los polímeros conductores

El tratamiento de los polímeros como ejemplo de las interacciones entre la ciencia, la industria y la sociedad permite añadir, por su actualidad, un comentario sobre los descubrimientos que han motivado la concesión del premio Nobel de Química de 2000. Anteriormente se ha incluido entre las propiedades de los polímeros su carácter de aislantes eléctricos, lo que ha permitido su uso generalizado para el recubrimiento de cables conductores. El citado premio Nobel se ha concedido a tres científicos, Heeger, MacDiarmid y Shirikawa, por el descubrimiento de los polímeros conductores, materiales que poseen conductividades eléctricas similares a las de los metales.

El trabajo de los premiados se desarrolló a finales de los años setenta, y se inició de una forma accidental cuando uno de ellos, el profesor Shirikawa, estudiaba la preparación de los isómeros *cis* y *trans* del poliacetileno. Un ensayo efectuado por error con una cantidad anormalmente grande de yodo empleado como catalizador condujo a un material de aspecto plateado, que resultó tener una conductividad eléctrica 10^9 veces superior al polímero que obtenía habitualmente, conductividad similar a la de los metales. La formación del poliacetileno conductor requiere, por una parte, la presencia de los dobles enlaces conjugados que posee dicha molécula, que se muestra en la figura 5, y, por otra, la generación de centros iónicos en la cadena polimérica por eliminación de electrones (oxidación) o incorporación de ellos (reducción). La oxidación se puede llevar a cabo con un halógeno, como el yodo, que da lugar a un polímero conductor con centros posi-

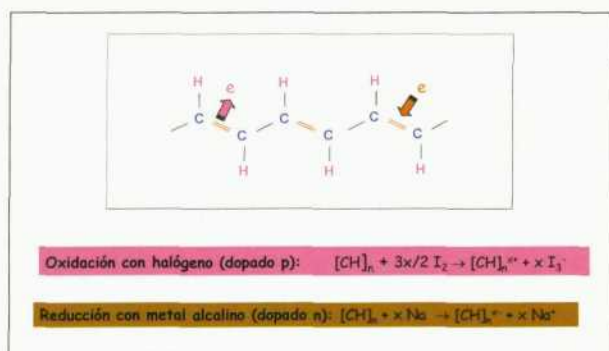


Fig. 5.— Mecanismos de dopado del trans-poliacetileno por oxidación o reducción.

tivos (dopado p); la reducción con un metal alcalino genera centros negativos (dopado n). La conducción en el polímero se lleva a cabo por un mecanismo complejo en el que intervienen los electrones p de los dobles enlaces conjugados y los centros generados en el dopado, sin que tenga lugar un desplazamiento de los electrones a través de la masa del polímero, lo mismo que ocurre en un metal. En la figura 6 se muestra la conductividad eléctrica de diferentes materiales conductores, semiconductores y aislantes, apreciándose la muy baja conductividad de los plásticos habituales, como el polietileno o el PVC, que es la base de su aplicación como aislantes eléctricos, y el amplio intervalo de conductividades que abarcan los polímeros conjugados dopados, que pueden comportarse bien como semiconductores, bien como conductores similares a los metales.

Aunque el poliacetileno dopado no ha encontrado aplicación debido a su escasa resistencia a la oxidación, su descubrimiento orientó hacia el estudio de otros materiales poliméricos conductores, como el polipirrol, la polianilina o el politiofeno, que han dado lugar a importantes aplicaciones industriales por su bajo coste y fácil preparación. Entre ellas destacan la fabricación de dispositivos

optoelectrónicos que aprovechan sus propiedades como fotoemisores y fotodetectores. Así, se han desarrollado diodos emisores de luz (LED), células fotoelectroquímicas emisoras de luz (LEC) y otros dispositivos basados en sus propiedades ópticas, tales como fotodetectores, sensores de imagen y láseres, siendo previsible su aplicación en nuevas pantallas de televisión y en sistemas potentes de almacenamiento y procesamiento de información.

EL CLORO Y LOS DERIVADOS CLORADOS

El cloro es un elemento esencial para la vida y uno de los más abundantes en la corteza terrestre. En la naturaleza existen más de 1 500 compuestos organoclorados naturales. El fuerte carácter oxidante del cloro y de algunos de sus derivados les confiere excelentes propiedades bactericidas y decolorantes, que han dado origen a muchas de sus aplicaciones actuales. A partir del cloro se fabrican más de 15 000 compuestos con múltiples aplicaciones en tratamiento de aguas, agricultura, productos farmacéuticos, polímeros y disolventes.

El consumo de cloro va asociado al desarrollo de los países. En la figura 7 se muestra cómo el cloro consumido por habitante y año es proporcional al producto interior bruto *per cápita* de diferentes países. Actualmente, la producción mundial de cloro alcanza 40 Mt/año.

Algunas de las aplicaciones del cloro han resultado decisivas para el bienestar de la humanidad. Así, la cloración del agua potable, generalizada en los países desarrollados desde principios del siglo XX, redujo sustancialmente la propagación de enfermedades y la introducción, en la década de los años cuarenta, de insecticidas organoclorados como el DDT provocó la reducción de epidemias que asolaban grandes regiones del planeta y la mejora en los rendimientos de los cultivos, proporcionando alimentos a amplios sectores de población con carencias nutricionales crónicas.

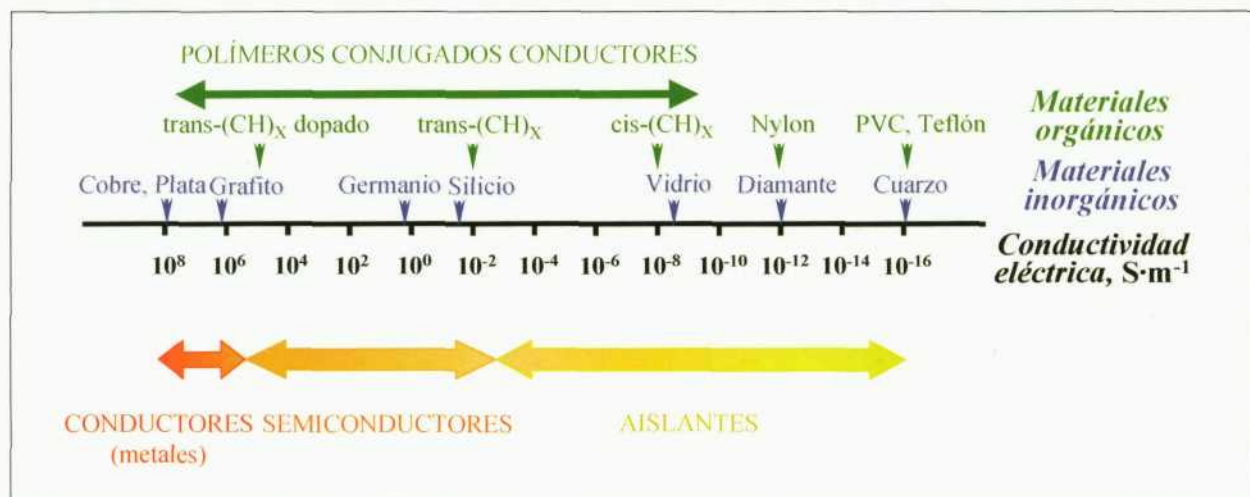


Fig. 6.— Conductividad eléctrica de varios materiales conductores, semiconductores y aislantes.

La misma producción del cloro y sus aplicaciones en potabilización de aguas, y en forma de derivados, como los plaguicidas o los cloro fluorocarburos, permiten analizar aspectos positivos y negativos asociados a los productos químicos.

Producción de cloro

El cloro se obtiene por electrólisis del cloruro sódico en disolución, utilizando celdas de diafragma o de cátodo de mercurio. Estas últimas presentan mejor eficacia energética y por ello se encuentran muy difundidas. Sin embargo, tienen como grave inconveniente la pérdida de mercurio hacia el ambiente por volatilización, mercurio que puede afectar tanto a los operarios de las plantas como al entorno.

La legislación medioambiental y las iniciativas de la propia industria de producción de cloro han introducido mejoras en las instalaciones, de modo que la emisión de mercurio se ha reducido drásticamente, pasando en Europa occidental de 56 t/año en 1986 a 14 t/año diez años después, lo que representa menos del 10% de todas las emisiones de mercurio antropogénico (150 t/año).

A pesar de ello, la UE ha previsto la eliminación total de las celdas de cátodo de mercurio para el año 2010.

Potabilización de agua

Desde principios del siglo XX se ha aprovechado el poder bactericida del cloro y de algunos derivados como los hipocloritos para asegurar la ausencia de microorganismos patógenos en las redes de distribución urbana. Por otra parte, su fuerte carácter oxidante se ha utilizado también para oxidar la materia orgánica presente en el agua a tratar, facilitando así su eliminación por filtración. De este modo, en las plantas de potabilización se ha aplicado el cloro en la primera etapa del tratamiento y al final del mismo, incorporando al agua que se distribuye una concentración de cloro de 1-2 mg/l.

En los años setenta, la disponibilidad de técnicas analíticas muy sensibles permitió detectar en las aguas potables la presencia de derivados halogenados del metano, como el cloroformo y el bromoformo, denominados genéricamente trihalometanos (THM), con una posible actividad cancerígena, en concentraciones muy reducidas, del orden de los µg/l. Estos compuestos se forman por reacción del cloro con compuestos como los ácidos húmicos durante la primera etapa de cloración. Como consecuencia de ello se ensayaron alternativas para evitar la formación de los THM, basadas principalmente en la sustitución del cloro por ozono, compuesto fuertemente oxidante que puede obtenerse en las propias plantas de tratamiento a partir del aire con un coste razonable. Las grandes plantas urbanas de potabilización incorporan equipos de ozonización con este fin. Sin embargo, el ozono, que es también un excelente agente bactericida, no puede utilizarse en la etapa final de desinfección, ya que se descompone con fa-

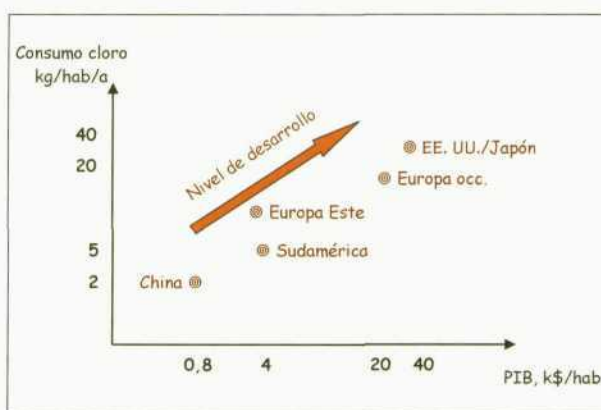


Fig. 7.- Consumo de cloro en función del PIB per cápita.

cilidad, por lo que no permanece activo durante todo el tiempo de residencia del agua en la red de conducciones, siendo posible una contaminación bacteriana. Por esta razón, sigue utilizándose el cloro como agente de desinfección final.

Compuestos fitosanitarios

El empleo de productos fitosanitarios para la prevención de plagas supuso una revolución en las técnicas agronómicas. Es indudable el efecto positivo que tuvo la introducción de plaguicidas orgánicos en la agricultura. Sin embargo, el descubrimiento del efecto de acumulación del DDT en organismos vivos y la publicación del libro *La primavera silenciosa* en los años sesenta determinaron, por una parte, la prohibición del uso del DDT y, por otra, una aversión hacia el uso de estos compuestos, aversión que, a pesar de los avances realizados, subyace aún. No se recuerda sin embargo que, según la OMS, más de 25 millones de personas salvaron su vida gracias al DDT desde 1939, año en que se descubrió, hasta el final de su uso. La agricultura biológica, sin abonos «químicos» y sin plaguicidas, es marchamo de calidad, frente a la agricultura intensiva tradicional. Sin embargo, el uso de abonos y compuestos fitosanitarios, y también de más eficaces métodos de conservación, ha permitido que la superficie cultivada en el mundo sea similar a la de 1950, alrededor de 1 400 millones de hectáreas, alimentando mejor a una población que ha aumentado más de dos veces en los últimos cincuenta años (de 2 500 a 6 000 millones de personas). En una reciente investigación llevada a cabo por un grupo de profesores alemanes se han estimado las pérdidas a nivel mundial por diversas causas en ocho de las producciones agrarias más importantes. Según este estudio, las pérdidas actuales debidas a plagas y enfermedades agrícolas suponen un 42% de la producción. Si no se utilizasen compuestos fitosanitarios dichas pérdidas alcanzarían el 70% de la misma.

Si consideramos otros aspectos de este problema, podemos ver, en primer lugar, cómo el avance del conocimiento sigue frecuentemente el método de ensayo y error.

Cuando tiene lugar un descubrimiento o un nuevo producto (la energía nuclear, el DDT, por ejemplo), la atención se centra en alguna propiedad de interés del mismo, pero con frecuencia se desconocen otros efectos perjudiciales que pueden ir asociados a él, que van apareciendo posteriormente durante su uso. Además, la ciencia aporta nuevos descubrimientos que corrigen defectos anteriores o proporciona nuevas generaciones de compuestos basados en principios diferentes, y de eficacia muy superior, con menores efectos secundarios. Así, la investigación fitosanitaria ha pasado del uso de compuestos inorgánicos como el sulfato de cobre, el azufre o las sales arsenicales (principios del siglo XX) y de plaguicidas orgánicos diseñados por vía empírica (ensayo de miles de sustancias y observación de su efecto) a métodos más sistemáticos que localizan moléculas potencialmente activas basándose en la bioquímica y en la química combinatoria, o bien a compuestos de origen natural, bioplaguicidas (microorganismos que originan toxinas para insectos) o, incluso, procedimientos asociados a modificaciones genéticas (que a su vez dan lugar a otro tipo de controversias). De este modo, cada vez se utilizan plaguicidas más eficaces y selectivos y menos dañinos para los seres vivos, y en particular para el ser humano. Un dato que refleja este aumento de eficacia es el consumo de fitosanitarios en España, que se redujo en más de un 20% durante el periodo 1986-1996.

La investigación y la experiencia adquirida abren nuevas vías para mejorar aún más la eficacia de estos productos con el objetivo final de reducir su toxicidad e impacto ambiental. Entre ellas pueden mencionarse:

- Nuevas formulaciones y modos de envasado, tales como la microencapsulación o el empaquetado en bolsas de poli(alcohol vínflico) hidrosolubles, que se añaden directamente al agua de pulverización, evitando el contacto durante la manipulación y la aparición de un residuo contaminado.
- Impedir la aparición de resistencias en los insectos y otros organismos que constituyen las plagas, mediante el conocimiento del mecanismo por el que se generan dichas resistencias y la aplicación de diferentes productos de modo alternativo.
- Aplicación de productos semioquímicos, compuestos que constituyen las vías de comunicación intra e interespecies, como las feromonas. Con ello se consigue confundir y alterar el comportamiento animal, facilitando la captura o impidiendo la reproducción.
- Síntesis de los isómeros activos en plaguicidas quirales. Se elimina así la parte no activa, que, sin embargo, puede ser tóxica, incrementando la eficacia.
- Obtención de especies vegetales resistentes a las plagas mediante agentes inductores, como el ácido salicílico.
- Acción contra las enfermedades víricas, todavía poco estudiadas.

Fluidos refrigerantes: los clorofluorocarburos

Los clorofluorocarburos o clorofluorocarbonos (CFC) constituyen un buen ejemplo del desarrollo de un producto de propiedades aparentemente excelentes, que contribuye a mejorar las condiciones de vida en todo el mundo, y que al descubrirse un efecto adverso sobre el medio ambiente ha de ser sustituido por otros compuestos.

Los circuitos de generación de frío requieren un gas fácilmente licuable por compresión que se utiliza para la extracción de calor del sistema. En la primera mitad del siglo XX se utilizó el amoníaco, que presentaba como principal inconveniente su carácter irritante. Por esta razón, sólo se aplicaba en máquinas industriales, no en el ámbito doméstico. Los derivados clorofluorados de los hidrocarburos, principalmente del metano, presentaban buenas propiedades como fluidos refrigerantes unidas a una gran estabilidad química y un carácter no tóxico. Los CFC permitieron la fabricación de refrigeradores y de equipos de acondicionamiento de aire destinados al hogar y la industria, hoy día de uso generalizado.

Sin embargo, en los años setenta, Molina y Rowland estudiaron las interacciones de los CFC con la radiación UV y el ozono de las capas altas de la atmósfera, demostrando que por esta vía podría producirse un agotamiento de la capa protectora de ozono. En 1985 apareció el agujero de ozono en el hemisferio sur, confirmando la teoría de Molina y Rowland, que recibieron por ello el premio Nobel de Química en 1991.

La industria, inicialmente escéptica, comenzó la sustitución de los CFC a fines de los años ochenta, al disponerse como alternativa de los derivados HCFC, que además de cloro y flúor contienen hidrógeno, con lo que se reduce en gran medida la acción destructora del ozono (del orden del 10% respecto al CFC 12). En 1987 se firmó el protocolo de Montreal, que, con las enmiendas de Londres (1992) y Copenhague (1993), propuso la eliminación de los CFC en 1996, la utilización transitoria de la HCFC hasta 2030 y la sustitución definitiva por hidrofluorocarburos (HFC) a partir de esta fecha.

UN EJEMPLO ADICIONAL: LOS ADITIVOS ANTIDETONANTES EN LA GASOLINA

La última década ha contemplado la sustitución progresiva de la gasolina tradicional por la denominada gasolina sin plomo. Una de las propiedades más características y conocidas de las gasolinas de automoción es su índice de octano, una medida del poder antidetonante de la gasolina en el motor. Elevados índices de octano permiten utilizar mayores razones de compresión en el motor y mejorar su eficacia energética. El índice de octano es función de la naturaleza de los hidrocarburos presentes en la gasolina, pero también puede aumentarse con ciertos aditivos. Durante mucho tiempo se ha venido utilizando plomo tetraetilo como agente antidetonante, com-

Tabla I. Accidentes importantes en la industria química o industrias relacionadas

<i>incendios industriales</i>					
año	lugar	origen	mueertos	heridos	evacuados
1994	Cleveland (Ohio, EE. UU.)	metano	136	77	
1966	Feyzin (Francia)	GLP	18	90	
1973	Staten Island (Nueva York)	GNL	40	0	
1978	Santa Cruz (México)	metano	52	0	
1985	México D. F.	GLP	650	2 500	31 000
<i>explosiones Industriales</i>					
año	lugar	origen	mueertos	heridos	evacuados
1948	Ludwigshafen (Alemania)	éter dimetilico	245	3 800	
1967	Lake Charles (Los Angeles, EE. UU.)	isobutano	7	13	
1974	Flixborough (Reino Unido)	ciclohexano	28	89	3 000
1975	Beek (Países Bajos)	propileno	14	107	
<i>escapes industriales</i>					
año	lugar	origen	mueertos	heridos	evacuados
1950	Pza. Rica (México)	fosgeno	10	0	
1976	Seveso (Italia)	dioxina/TCDD	0	0	730
1977	Cartagena (Colombia)	amoníaco	30	25	
1978	Baltimore (Maryland, EE. UU.)	dióxido de azufre	0	100	
1984	Bhopal (India)	isocianato metilo	2 000	50 000	200 000
<i>otros accidentes</i>					
año	lugar	origen	mueertos	heridos	evacuados
1978	Los Alfaques (España)	escape/incendio de propileno	216	200	
1979	Three Mile Island (EE. UU.)	fallo reactor nuclear	0	0	200 000
1986	Chernobil (Ucrania)	fallo reactor nuclear	31	299	135 000

puesto muy eficaz pero que incorporaba a la atmósfera cantidades significativas de plomo, metal pesado tóxico. Para sustituir el plomo tetraetilo se seleccionaron ciertos compuestos oxigenados de alto índice de octano, como los éteres y los alcoholes. El metil-tercbutiléter (MTBE) es miscible con la gasolina y se obtiene de forma económica, por ello ha sido y es todavía componente esencial de las gasolinas sin plomo. Sin embargo, recientemente se ha comprobado que el MTBE, debido a su solubilidad en agua, se difunde fácilmente al suelo al producirse pérdidas durante el llenado o fugas en los depósitos, contaminando los acuíferos. Este hecho, unido a su posible carácter cancerígeno, ha determinado el inicio de un movimiento para la eliminación del MTBE como aditivo de las gasolinas. Ello obliga a buscar un sustituto que no presente estos inconvenientes. Una alternativa parece encontrarse en el etanol, que ya se utiliza ampliamente como combustible en algunos países que pueden fabricarlo por vía fermentativa a partir de residuos vegetales, como Brasil.

SEGURIDAD E IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA

No puede negarse que la industria química es una actividad potencialmente peligrosa, debido a la naturaleza

de muchos de los productos que maneja, que poseen carácter inflamable o explosivo o tienen efectos tóxicos sobre el hombre, los animales o las plantas. La peligrosidad puede afectar tanto al funcionamiento interno de las plantas químicas como a su entorno, a través de sus efluentes normales o a causa de accidentes.

Los accidentes en las plantas químicas no son infrecuentes, a pesar de que las medidas de seguridad son siempre muy elevadas. Algunos accidentes han sido particularmente graves y, lógicamente, han tenido gran repercusión, bien por causar daños personales, bien por afectar al medio ambiente. En la tabla I se muestran algunos accidentes notables de las últimas décadas. Varios de ellos no corresponden estrictamente a la industria química, sino que se deben a la distribución de combustibles (oleoductos, gases licuados) o a centrales nucleares (Three Mile Island o Chernobil).

El gran impacto de alguno de estos accidentes ha generado una imagen de peligrosidad e inseguridad en la industria química. Sin embargo, al igual que ocurre en otros campos, como los accidentes aéreos, los datos cuantitativos no coinciden con esta impresión. En el análisis de riesgos se utiliza el índice FAR (*Fatal Accident Rate*), que expresa la tasa de accidentes mortales en una industria tras 10^8 horas de actividad, equivalentes a toda la vida laboral de 1 000 empleados. Este índice es próximo a 5 en la industria química, mientras que en la agricultura, la minería

y la construcción es de 10, 12 y 64, respectivamente. Además, se estima que un 80% de los accidentes en plantas químicas son inespecíficos, es decir, se deben a golpes, caídas, etc., y no directamente a los productos que se manejan.

La actividad humana se mueve en muchas ocasiones en situaciones de riesgo, a veces sin tener una clara percepción de ello. Buenos ejemplos pueden ser la navegación aérea o la circulación en automóvil, ya que los pasajeros viajan junto a depósitos que contienen miles o decenas de litros de compuestos inflamables.

El riesgo es la probabilidad de que pueda darse una situación de peligro para personas, medio ambiente o propiedades, o de que ocurra un accidente real al modificarse las condiciones del sistema. En todas las actividades humanas existe un riesgo, pero su valor puede ser más o menos elevado. El riesgo de una instalación puede modificarse implantando medidas de seguridad.

Otro aspecto crítico en la industria química es su impacto medioambiental. La industria química, como otras muchas industrias (del curtido, textil, papelera, alimentaria...) y la propia actividad humana, sobre todo en las ciudades, origina corrientes residuales que se vierten a la atmósfera, a los cauces públicos o al suelo. Durante mucho tiempo, estas corrientes se han eliminado prácticamente sin tratamiento, y la dilución en el aire o en el agua ha sido el método más común para reducir sus efectos.

Aunque pueda sorprendernos, hace cuarenta años el término «medio ambiente» no era de uso común. En los años sesenta, la sociedad tomó conciencia progresiva del problema a partir de varios hechos, tales como la contaminación severa en áreas industriales y en las grandes concentraciones urbanas, el efecto del DDT sobre los animales y el hombre, las acciones secundarias de fármacos como la talidomida, la eutrofización de los lagos por la presencia de fosfatos provenientes de los detergentes y, también, alguno de los accidentes industriales graves ya mencionados. Paralelamente surgió la necesidad de intervenir activamente para proteger nuestro entorno. Así, en Estados Unidos se celebró por primera vez el día de la Tierra en 1970, se creó la Environmental Protection Agency (EPA) en 1972 y se promulgaron las Clean Air and Clean Water Acts, primeras legislaciones modernas con un tratamiento global del problema.

La legislación medioambiental se ha generado en muchos casos como consecuencia de accidentes (un buen ejemplo son las directivas europeas Seveso I y II para el manejo de compuestos tóxicos o peligrosos), pero también va unida al progreso científico y tecnológico. Así, la mejora de las técnicas instrumentales analíticas ha permitido detectar a niveles asombrosamente bajos contaminantes muy tóxicos como son las dioxinas y furanos, los trihalometanos o los metales pesados.

Asimismo, en este periodo ha surgido una extensa tecnología del medio ambiente, encaminada tanto a la detección y diagnóstico de problemas como a su corrección, siguiendo siempre la jerarquía que se muestra en la figura.

CRECIMIENTO SOSTENIBLE. COMPROMISO DE PROGRESO

El movimiento por un desarrollo o crecimiento sostenible surge a finales de los años ochenta como una consecuencia de la inquietud social por el deterioro medioambiental y por el consumo acelerado de los recursos naturales. En principio se trata más de un diagnóstico que conduce a una propuesta: la integración de los factores económicos con los ambientales y sociales para la toma de decisiones, de modo que sean realmente beneficiosas para la humanidad a medio plazo.

En 1987, la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de la ONU enunció que «el desarrollo sostenible debe satisfacer los requerimientos actuales sin comprometer a las generaciones futuras», es decir, debe tender a la conservación racional de los recursos físicos, naturales y humanos disponibles.

En la última década, las grandes empresas han tratado de introducir este concepto en su estrategia. Así, DuPont establece que, desde el punto de vista de la empresa, el desarrollo sostenible debe «crear nuevo accionariado y valor societario a la vez que se reducen las huellas de la compañía en la cadena de producción». Estas huellas afectan a todo el proceso productivo, desde las materias primas (consumo de recursos) hasta las emisiones finales, incluyendo posibles daños a los empleados o a la sociedad y al medio ambiente circundante.

Estos criterios que se tratan de incorporar a la política de decisión empresarial son muy diferentes a los seguidos hasta hace pocas décadas, donde crecimiento era sinónimo únicamente de mayor producción y mayor beneficio económico.

Algunas razones que apoyan la inclusión de estos criterios son:

- El beneficio medioambiental asociado con la reducción de las emisiones a la atmósfera y a las aguas y de los residuos a eliminar.
- La disminución del consumo de agua, principalmente en su aplicación como medio refrigerante.
- La contención del consumo de materias primas no renovables escasas, como el petróleo o los minerales.

Las actuaciones de carácter general que van dirigidas hacia el desarrollo sostenible son:

- Análisis de la situación medioambiental, particularmente la detección de medios contaminados, y el seguimiento de los posibles efectos.
- Reparación de daños medioambientales.
- Desarrollo de tecnologías limpias, que reduzcan las emisiones y la generación de subproductos.
- Aumento de la eficiencia energética e incorporación progresiva de nuevas formas de energía, principalmente renovables.

Sin embargo, el grado de sostenibilidad no puede medirse fácilmente a causa del carácter holístico de este concepto. En la actualidad, las grandes empresas químicas y asociaciones profesionales están definiendo parámetros cuantitativos que permitan medir el efecto sobre la sostenibilidad de un determinado proyecto, que incluyen términos económicos y de impacto ambiental, concepto que en conjunto equivale a la denominada ecoeficiencia. Aunque todavía no se dispone de modelos completos contrastados que permitan medir el grado de sostenibilidad o ecoeficiencia de un proceso dado en conjunto, en la tabla II se muestran algunos factores que se incluyen en el análisis. Como ejemplo, el consumo o intensidad de energía y el impacto de un producto o efluente sobre la salud humana se calculan del siguiente modo:

$$\text{Consumo de energía} = \frac{\text{Energía total consumida}}{\text{Valor del producto}}$$

$$\text{Impacto sobre salud} = \frac{(\text{Vida media producto}) (\text{Factor bioacumul.})}{(\text{Límite de exposición permitido})} (\text{Masa emitida})$$

Tabla II. Parámetros para medir el grado de sostenibilidad de un proyecto

- Consumo de materia
- Consumo de energía
- Consumo de agua
- Impacto de productos sobre la salud humana
- Generación fotoquímica de ozono
- Generación de gases invernadero
- Acidificación
- Eutrofización
- Ecotoxicidad
- Reciclabilidad del producto

Estos criterios se fijan por aproximaciones, ya que no se conoce *a priori* el peso que cada factor debe tener en el conjunto. La determinación de estos parámetros seguirá sin duda un método de ensayo y error en el que subyacen fuerzas contrapuestas: por una parte, los intereses económicos de las empresas, que siempre estarán presentes, y por otra, la necesidad de seguir efectuando correcciones para impedir un deterioro irrecuperable del entorno y de los recursos naturales.

En cualquier caso, el conocimiento científico puede contribuir al avance en la dirección adecuada. La química actual permite cada vez en mayor grado trabajar como una ciencia exacta, fabricando compuestos a medida. Dos buenas muestras de ello pueden ser el diseño de moléculas que posean una actividad determinada, por ejemplo como fármacos o como plaguicidas, y la preparación de catalizadores que conduzcan selectivamente a un producto dado. En este último campo puede destacarse la catálisis quiral, desarrollada en los últimos años. Un catalizador con forma y centros activos adecuados puede conducir a uno solo de los isómeros ópticos de un compuesto quiral. Este hecho tiene gran relevancia, ya que muchos compuestos de interés farmacológico son quirales y sólo uno de los isómeros es activo. Por esta vía se evita la obten-

ción de una cantidad equivalente del isómero inactivo (o incluso tóxico), a la que conducen otros métodos de síntesis.

A pesar de todo ello, conviene retomar el significado de las dos palabras que componen el término «desarrollo sostenible», que tienen un carácter contrapuesto: «desarrollo» implica crecimiento, crecimiento que debería centrarse no en los países desarrollados, con alto nivel de vida, sino en aquellos otros que carecen de lo más esencial. Por el contrario, «sostenible» da idea de contención, tendencia que debería afectar esencialmente a los países más avanzados.

Aunar ambos parámetros para lograr simultáneamente un crecimiento ordenado y un uso armónico de materias primas y energía presenta dificultades, a pesar de las acciones emprendidas. Baste recordar que en los próximos treinta años se prevé un aumento de la población cercano a los 3 000 millones de personas, aumento que se producirá, además, en las zonas menos favorecidas.

Las compañías químicas más importantes han suscrito un Compromiso de Progreso mediante el que tratan de transmitir a la sociedad su voluntad de operar en la dirección del desarrollo sostenible.

Dicho compromiso se refleja en las siguientes acciones:

- Concienciación Social. Prevención de emergencias. Transmitir a la sociedad los objetivos de la industria química y prever situaciones de emergencia que puedan afectarla.
- Salud y seguridad de los trabajadores de la empresa. Cumplimiento de normas de calidad como ISO 9000. Disminución de los accidentes. En España, de 1993 a 1999 los accidentes con baja laboral disminuyeron de 16 a 13 por millón de horas trabajadas.
- Seguridad de los procesos. Reducir el riesgo de accidentes. Aplicación de normas de calidad.
- Prevención de la contaminación. Minimizar el consumo de materias primas, agua y energía. Implantación de procesos más selectivos, con menos subproductos. Cumplimiento de las Normas ISO 14000. Como ejemplo, la industria química española redujo el consumo de agua en un 35% por unidad producida entre los años 1993 y 1999.
- Mejora de la seguridad en el transporte.
- Seguimiento del producto durante su vida útil. Asesoramiento a los usuarios.

Por una parte se trata realmente de un compromiso con la sociedad y el medio ambiente para una operación más eficaz y segura. Pero también se trata con él de dar una mejor imagen de la química y de la industria química a la sociedad. En los doce años de funcionamiento del Compromiso de Progreso en los países desarrollados, las encuestas indican una leve mejora de dicha imagen, si bien todavía casi un 50% de la población mantiene una imagen negativa.

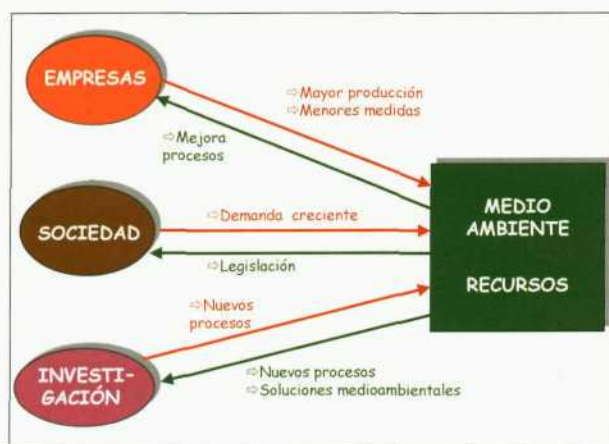


Fig. 8.— Acciones de la sociedad, la investigación y la industria sobre el medio ambiente y los recursos.

CONCLUSIÓN

La química, como ciencia desarrollada por el hombre, y sus aplicaciones a través de los procesos industriales han efectuado aportaciones relevantes al bienestar humano, como se ha puesto de manifiesto a través de algunos ejemplos. Sin embargo, se detecta una falta de percepción pública de su «sentido de utilidad», posiblemente a causa de que los productos químicos rara vez llegan como tales al consumidor, sino que se incorporan como componentes de los productos de consumo o intervienen solamente en etapas intermedias de su fabricación (así ocurre con productos textiles, automóviles, material fotográfico, chips, etc.). Muy al contrario, la incidencia medioambiental de los efluentes industriales o la intensidad de algunos accidentes ha generado una mala imagen de la química.

Einstein valora al científico ideal como un ente aislado, centrado en el descubrimiento de la verdad, en decir, en la comprensión de la realidad por medio del pensamiento. Sin embargo, al analizar la posición del científico en la sociedad, señala, por una parte, el orgullo de contribuir a la transformación de la vida de la humanidad mediante el descubrimiento de recursos y, por otra, su angustia al saber que estos descubrimientos pueden constituir una amenaza para ella por el mal uso de otros miembros de la sociedad (poderes políticos o económicos, utiliza-

ción con fines militares, comercialización abusiva), fuera ya de su control.

La química y la industria química forman parte de un complejo sistema en el que intervienen la sociedad, como beneficiaria de los productos surgidos de la investigación y el desarrollo industrial y como sujeto paciente y también artífice de las alteraciones medioambientales, la investigación, promotora de nuevos conocimientos, productos y procesos, así como de nuevos métodos para luchar contra el deterioro del entorno, y la economía, a través de la industria, para la generación de riqueza.

Este sistema está sometido a acciones de efectos contrarios provocadas por cada uno de los agentes (figura 8), cuya resultante conduce al agotamiento más o menos acelerado de los recursos naturales y a los efectos consiguientes sobre el medio ambiente.

La búsqueda de un equilibrio razonable en todo el sistema es el reto de la sociedad en su conjunto, no de ninguna de sus partes aisladamente, reto que presenta grandes incógnitas en un sistema de economía liberal y globalizada como el actual.

BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE, *Medio ambiente en Europa: Segunda evaluación* (trad. española), Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 2001.
- ALLCHEMÉ (Alianza para la Ciencia y Tecnología Química en Europa), *Química. Europa y el futuro*, 1999.
- FEIQUE (Federación Empresarial de la Industria Química Española), *La industria química en el siglo XXI. Desarrollo sostenible y compromiso de progreso*, Madrid, 1999.
- MARTÍN LEÓN, N., «Premio Nobel de Química 2000», *An. Quím.* 96, n.º 4, 2000, págs. 27-30.
- PETERSON, R. R., «Moving toward Sustainable Development», *Chem. Engng. Progr.* 95, n.º 1, 1999, págs. 57-61.
- REISCH, M. S., «From coal tar to crafting. A wealth of diversity», *Chem. Engng. News*, 12 de enero de 1998, págs. 79-109.
- <http://www.nobel.se/announcement/2000/cheminfo-en.html>.