

DEL TEQUESQUITE AL ADN. ALGUNAS FACETAS DE LA QUÍMICA EN MÉXICO

Autor: ANDONI GARRITZ RUIZ y JOSÉ ANTONIO CHAMIZO

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [DEDICATORIA](#)
- [INTRODUCCIÓN](#)
- [I. LA QUÍMICA EN MÉXICO. UN POCO DE LA HISTORIA CIENTÍFICA MEXICANA](#)
- [II. EL PETRÓLEO Y SUS QUIMIDERIVADOS](#)
- [III. MACROMOLÉCULAS](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Gerardo Cabañas

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Raúl Herrera

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Inicio |



Primera edición (La Ciencia para todos), 1989

Segunda edición, 1995

Tercera edición (La ciencia para Todos), 1997

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra

—incluido el diseño tipográfico y de portada—,

sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico,

sin el consentimiento por escrito del editor.

La ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D.R. © 1989 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S.A. DE C. V.

D.R. © 1995 y 1997 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-5232-0 (3a. edición)

ISBN 968-16-4735-1 (2a. edición)

ISBN 968-16-3038-6 (1a. edición)

Impreso en México

[Inicio](#)



DEDICATORIA

A nuestros padres:

JESÚS DE GARRITZ

JOSÉ CHAMIZO

Inicio |



INTRODUCCIÓN

QUÍMICA: LA CIENCIA CENTRAL

Podría decirse que la química es la ciencia de las transformaciones de la materia. Durante un cambio químico, la apariencia de las cosas se modifica de manera radical. Por ejemplo, parece mentira que a partir de un metal muy activo (el sodio) y un gas tóxico verdoso (el cloro) se obtenga la sal con la que condimentamos los alimentos. Tampoco el leño que se mete a la hoguera en nada se parece a las cenizas que se recogen y a los gases que se producen durante su combustión.

Esa *magia* del cambio químico ha fascinado a la especie humana durante siglos. Es suficiente imaginar la cara de los primeros humanoides al ver el oscilante e inexplicable fuego durante una combustión, o la de quien por primera vez logró transformar las piedras ¡en lustrosos metales! También debió ser espectacular el descubrimiento alquímico del mercurio. Basta calentar el mineral rojizo llamado cinabrio para ver cómo se empiezan a condensar las gotas de este bello metal líquido.

Aunque la explicación científica del cambio químico tardó muchos siglos en llegar, el hombre aprendió a transformar los materiales desde sus primeras épocas. En el primer capítulo de este libro citamos algunos casos notables logrados en el valle del Anáhuac y zonas circunvecinas, antes y después de la Colonia. Los dos capítulos restantes están dedicados a comentar otros tantos ejemplos de lo que la química puede hacer para transformar la materia. Es suficiente trastocar mínimamente la estructura de las moléculas para obtener nuevos productos, con propiedades totalmente diferentes. El primer ejemplo trata someramente la química del petróleo y el segundo la existencia y producción de moléculas gigantes, llamadas polímeros. En ambos comentaremos la situación de México.

Hoy, la química es considerada una ciencia básica. Con justicia se le denomina *la ciencia central*, pues se nutre de los resultados de la física y proporciona a la biología el fundamento molecular de los fenómenos en los seres vivientes.

Hace apenas 200 años que los trabajos de pioneros dieron base sólida y método científico propio a la química. Se trata, sin duda, de una ciencia joven. Sin embargo, ese tiempo relativamente corto ha servido para orientar al hombre hacia la transformación de la naturaleza. La química ha sido útil para obtener nuevos materiales, de los que estamos rodeados, para interpretar multitud de fenómenos, incluida la vida misma. No obstante, no siempre estas transformaciones inducidas se han llevado a cabo con el respeto que la naturaleza merece. En el proceso de sanear nuestra contaminada biosfera, la química también habrá de ser empleada como *herramienta* central.

El objetivo medular que se persigue es que el lector haga propios los alcances de esta ciencia y se percate de su presencia constante en la vida cotidiana del ser humano moderno, en este país y en el mundo entero. Intentamos, pues, compaginar este trabajo justificando así el nombre de esta serie: La Ciencia desde México.

Cuando se hace necesario empleamos palabras propias del *vocabulario químico*, así como fórmulas; no hacerlo sería equivalente a querer narrar un partido de fútbol sin mencionar *tiro de esquina*, *pena máxima* o ni siquiera, *¡gol!* Sin embargo, hemos puesto cuidado de no inundar el texto de tecnicismos que lo vuelvan ilegible. Es más, la incorporación del lenguaje químico se ha hecho paulatinamente. La densidad de conceptos y fórmulas es mayor hacia el final.

A lo largo de la obra hemos utilizado recuadros para explicar más detalladamente algunos términos usuales en la química. Estos recuadros podrán ser evitados por el lector conocedor, pero representan un *microcurso* de química para el no familiarizado con esta ciencia, como un estudiante de secundaria, por ejemplo.

Resulta perentorio presentar al mexicano común y corriente una imagen útil y cotidiana de la química. Es indispensable modificar radicalmente los esquemas predominantes de la difusión y la enseñanza de las ciencias. Para lograrlo se requiere incorporar tempranamente temas de la química orgánica, como los que se presentan en los capítulos II y III de esta obra. En resumen, esperamos que la lectura de este libro proporcione una idea realista e interesante de la ciencia central, que motive al lector a la profundización y venza, en por lo menos algún estudiante, la fobia existente hacia el aprendizaje de las ciencias. Si ello ocurre, los autores estaremos satisfechos,

pues estamos convencidos de que este país no irá a ninguna parte sin más y mejores científicos e ingenieros.

Julio de 1988

Casi seis años después de haber escrito la primera introducción, nuestro pensar no se ha transformado un ápice respecto a los objetivos que guiaron la escritura de esta obra. No obstante, nuestro mundo sí ha evolucionado a velocidad impensable. Los cambios en nuestro país han sido fundamentales, por lo menos en los aspectos económico y ambiental.

Del tequesquite al ADN se ha vuelto una lectura común para muchos estudiantes del bachillerato, gracias a la estupenda acogida que le dieron un sinnúmero de profesores. Nos ha tocado analizar el libro en una multitud de escuelas y gozar con el hecho de que reseñas del mismo hayan sido premiadas en el concurso Para leer la Ciencia desde México. En esas ocasiones, al conocer los puntos de vista de los lectores jóvenes, se hizo transparente para nosotros la necesidad de actualizarlo. En los alumnos surgían nuevas preguntas que la primera edición no alcanzaba a resolver: ¿qué es la gasolina Magna Sin? ¿Y el diésel Sin? ¿Y los convertidores catalíticos de los autos? ¿Todavía no se hacen detergentes biodegradables en México?

Las transformaciones más importantes de esta revisión afectaron esencialmente al segundo capítulo, aunque los otros dos también las sufrieron. El resultado nos vuelve a dejar satisfechos. Veremos cuánto tiempo nos dura la satisfacción. Suponemos que poco, pues cada día prospera una conciencia ambiental más clara, más equilibrada y más profunda. La industria química realiza esfuerzos importantes dirigidos hacia el bienestar de sus trabajadores, sus consumidores y el medio ambiente, así que su metamorfosis continuará. Y con ella la de *Del Tequesquite al ADN*.

ANDONI GARRITZ

JOSÉ ANTONIO CHAMIZO

Enero de 1994



I. LA QUÍMICA EN MÉXICO. UN POCO DE LA HISTORIA CIENTÍFICA MEXICANA

CIERTO ES que la química, como parte de la ciencia, es un patrimonio universal. Cualquiera de sus leyes y teorías puede ser verificada en cualquier punto del planeta, siempre que se siga la experimentación adecuada. No obstante, el desarrollo de la ciencia sigue modelos cambiantes de un lugar a otro. La actividad científica misma se desenvuelve en un medio local que influye sobre ella. Por esta razón, diversos pasajes de este capítulo contienen citas, datos y anécdotas correspondientes al desarrollo de la química en México.

Debido a diferentes razones, la investigación científica ha prosperado muy lentamente en el país. En particular, la investigación química sufre un retraso adicional cuando se la compara con la que se realiza en otras ciencias básicas, tales como la física o la biología. Sin embargo, aquí se han dado diversos hallazgos sobresalientes, algunos de los cuales vale la pena relatar en este capítulo.

LOS ÁTOMOS EN ELEMENTOS Y COMPUESTOS

¿Podría el lector levantar la vista del libro en este momento? Observe la solidez de las paredes de la casa, ese objeto metálico, aquel vistoso árbol, los colores de ese cuadro, el aire aparentemente inexistente, el café que toma en esa taza de plástico, el papel y la tinta de este libro... Todo, todo cuanto existe está formado por una cantidad menor que cien elementos, del hidrógeno al uranio. Bastan 92 de esos "ladrillos" para construir cualquier cosa. ¿Cómo es posible tal diversidad?

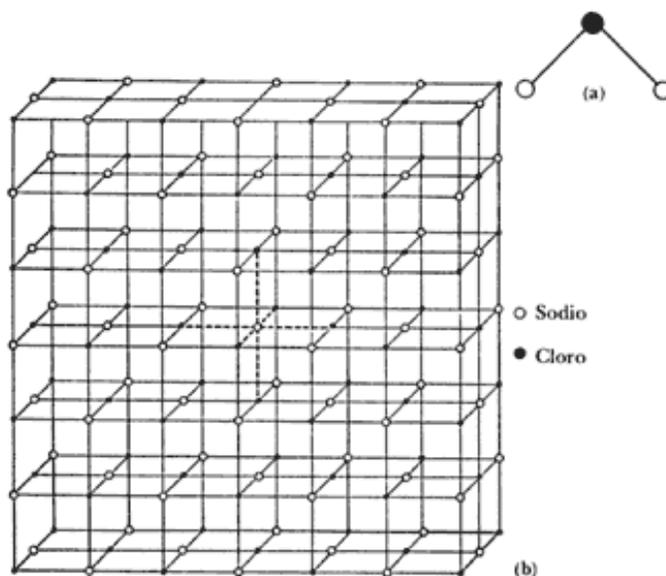


Figura 1. Dos tipos de agregados estables de átomos. a) Molécula del agua que muestra dos átomos de hidrógeno enlazados a un oxígeno. b) Red de cloruro de sodio. En este compuesto los átomos de cada elemento adquieren carga eléctrica y forman lo que se conoce como iones. De aquí el nombre de sólidos iónicos.

Para los griegos, todas las cosas estaban hechas por diferentes proporciones de aire, agua, fuego y tierra. Esta visión cambió conforme pudieron separarse los componentes de las mezclas. Así, los científicos encontraron sustancias puras que no podían descomponerse en otras más simples. Estas sustancias reciben el nombre de *elementos químicos*. Por ejemplo, hace apenas dos siglos sabemos que ni el aire ni el agua son sustancias

elementales.

Fue el inglés John Dalton, un profesor de escuela, quien hacia principios del siglo pasado esbozó la respuesta: Toda la materia está formada de pequeñísimas partículas, los *átomos*, de los cuales existen en forma natural menos de una centena.

De esta forma surgió la primera clasificación de las sustancias puras. Los *elementos* están formados por una multitud de átomos, pero todos equivalentes. Por su parte, los *compuestos* contienen átomos de dos o más diferentes elementos. Así, por ejemplo, el hierro es un elemento; sólo contiene un tipo de átomo, el de hierro. Sin embargo, la herrumbre es hierro oxidado, por lo tanto, un compuesto con átomos de hierro y oxígeno, al que pomposamente los químicos denominamos óxido de hierro (III).

SÍMBOLOS Y FÓRMULAS QUÍMICAS

Desde el siglo pasado, los químicos usan letras mayúsculas, seguidas en ocasiones por una minúscula, para dar símbolo a un átomo o un elemento. Así, H significa un átomo de hidrógeno, o también el elemento hidrógeno.

C	carbono
H	hidrógeno
O	oxígeno
N	nitrógeno
P	fósforo
S	azufre

Los anteriores son los símbolos de los seis elementos constituyentes de todos los seres vivos.

Los símbolos químicos provienen de palabras del latín. Por ejemplo, Fe viene de *ferrum*, la palabra latina para designar al hierro. El extraño símbolo del sodio, Na, viene del latín *natrium*.

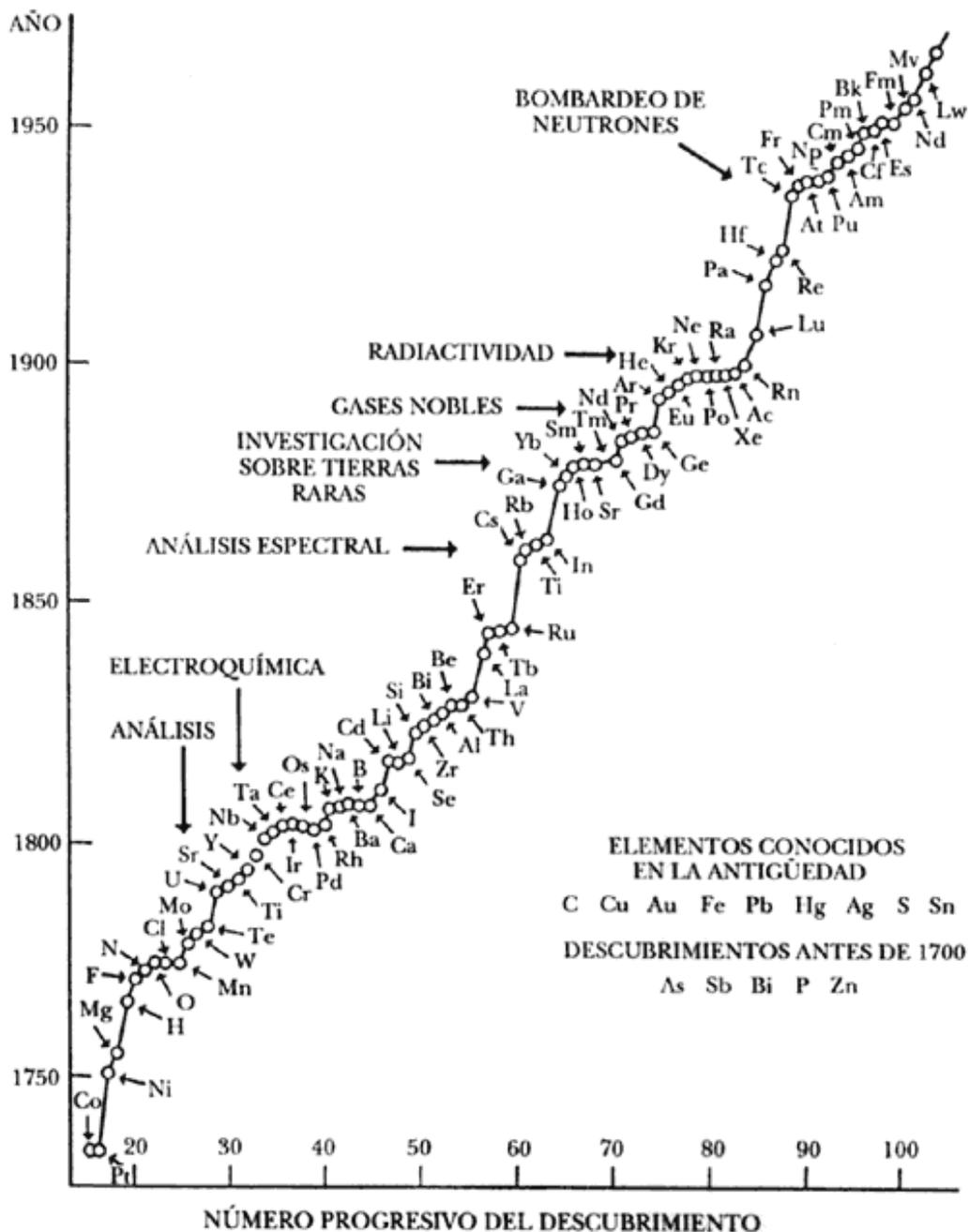


Figura 2. Cuadro cronológico del descubrimiento de los elementos químicos. Se citan también las técnicas que llevaron a los hallazgos. (Tomado de Cruz, Chamizo y Garritz, *Estructura atómica. Un enfoque químico*, Addison Wesley Iberoamericana Wilmington, 1986.)

Los átomos pueden formar agregados estables que caracterizan a todo material puro. Un tipo de agregado, las *moléculas*, contiene unos pocos átomos reunidos. Otros, por el contrario, están formados por enormes bloques de elementos repetidos que se encuentran enlazados, los llamados *sólidos iónicos*.

El número de combinaciones que pueden alcanzarse a partir de 92 elementos es impensable, de allí la diversidad de ellas en la naturaleza.

Para abreviar y referir a las sustancias puras con propiedad, el químico hace uso de fórmulas, expresando los elementos presentes y la proporción que existe en aquellas de cada uno de los átomos.

Cuando escribe "**NaCl**", el químico habla de una sustancia que sólo contiene sodio y cloro, y que por cada átomo de sodio contiene uno de cloro. Sólo hay un compuesto con estas características: la sal común. Por otro lado, el bicarbonato de sodio que se empleaba para combatir las agruras tiene por fórmula **NaHCO₃**, por lo cual debe entenderse que cada átomo de sodio viene acompañado de uno de hidrógeno, uno de carbono y tres de oxígeno.

EN EL MEXICO PREHISPÁNICO

Desde antes de la Conquista, los pobladores del valle de México sabían de la existencia y el aprovechamiento de las sales alcalinas. En tiempo de secas, estas sales afloraban a la superficie y formaban costras, que recibieron el nombre de *tequixquitl* o tequesquite. Sahagún cita que: "La tierra salitrosa se llama *tequixquitlalli*, que quiere decir tierra donde se hace el salitre." El lago de Texcoco contiene 81% de sales, entre las que sobresale el carbonato de sodio, **Na₂CO₃**, con 45%, y el cloruro de sodio, NaCl, con 34 por ciento.

El comercio del tequesquite se hacía en Iztapalapa, nombre que significa "pueblo donde se recoge la sal" o *ixtail*. Así, en el nombre Ixtapan de la Sal se hace un uso redundante de dos lenguas.

Al añadir el tequesquite a la comida se condimentaba con sal y se facilitaba la cocción de las legumbres. También se lo empleó como detergente alcalinizante ligero.



Figura 3. El caracol. Las aguas del lago de Texcoco siguen siendo aprovechadas hoy para obtener carbonato de sodio. Como primer paso, la industria Sosa Texcoco emplea un enorme evaporador solar, ¡de 800 hectáreas!, que concentra en sales las aguas extraídas del subsuelo. (foto tomada del artículo "un caracol gigante permanece activo", ICYT, núm. 136, enero de 1988, p.47. cortesía del ingeniero Alberto Urbina del Razo.)

LOS ÁCIDOS, LAS BASES Y LAS SALES

En química, como en todas las ciencias, se acostumbra efectuar clasificaciones. En este caso, lo que se clasifica son los tipos de sustancias puras conocidas. Existen unas —los *ácidos*— con sabor agrio, que cuando se disuelven en agua liberan partículas llamadas iones hidrógeno (**H⁺**). Un ejemplo es el vinagre, que es una disolución de ácido acético en agua. Otras sustancias —las *bases*, también llamadas *álcalis*— tienen un sabor amargo y se sienten resbalosas al tacto. Al disolver una base en agua se reduce la proporción de iones hidrógeno. La leche de magnesia que tomamos contra la acidez estomacal es una base.

Se puede decidir si un compuesto es *ácido* o *base* gracias a sustancias especiales, llamadas *indicadores*, que cambian de color en función de la concentración de los iones hidrógeno presentes. Por ejemplo, el papel tornasol adquiere color rojo en presencia de un ácido, y azul frente a una base. Hasta un té negro cambia de color al

añadirle unas gotas de limón, ¿verdad?

Ácidos y bases desempeñan un papel esencial en la química de nuestra vida diaria. Son ampliamente utilizados en diversos procesos de manufactura y de ellos depende, entre otras cosas, el correcto funcionamiento de nuestro cuerpo y el de todos los seres vivos. Por ejemplo, la acidosis o la alcalosis de la sangre pueden provocar la muerte. Igualmente, la mayoría de las cosechas crecen sanamente en suelos ligeramente ácidos. De esta forma, del análisis que lleve a cabo y de las medidas que tome el químico agrícola, depende la productividad del suelo y, por lo tanto, la existencia de suficiente alimento.

Ambos tipos de compuestos se combinan, aniquilando uno al otro sus propiedades originales. El resultado es la formación de una *sal*. La sal común —**NaCl**, cloruro de sodio— se obtiene al combinar un ácido que contiene cloro (**HCl**, ácido clorhídrico) con una base que posee sodio (**NaOH**, hidróxido de sodio o sosa cáustica, que, por cierto, es común para las amas de casa, pues ¡es buena para destapar caños obstruidos!).

En el cuadro 1 se muestran los nombres de algunas sales con sus aplicaciones.

CUADRO 1. Algunas sales y sus aplicaciones.

<i>Nombre</i>	<i>Aplicaciones</i>
Bicarbonato de sodio (polvo para hornear)	Antiácido
Bromuro de plata	Emulsiones fotográficas
Carbonato de sodio deshidratado (sosa de lavar)	Manufactura del vidrio; ablandador de agua
Cloruro de calcio	Para deshielo de calles y aceras en países fríos
Cloruro de potasio	Sustituto de la sal, libre de sodio
Cloruro de sodio (sal de mesa)	Electrolito corporal; manufactura de cloro y sosa cáustica
Fluoruro de sodio (fluorita)	Para obtener derivados fluorados (el teflón de las sartenes, por ejemplo)
Ioduro de sodio	Se mezcla con la sal común para prevenir el bocio
Nitrato de plata	Agente cauterizante
Permanganato de potasio	Desinfectante y fungicida
Sulfato de aluminio y potasio (alumbre)	Industria del vidrio; pigmentos y tintorería
Sulfato de amonio	Fertilizante
Sulfato de bario	Estudios gastrointestinales; pigmento blanco
Sulfato de calcio dihidratado	Yeso para construcción
Sulfato de cobre pentahidratado (azul de vitriolo)	Tintura; fungicida
Sulfato de magnesio heptahidratado (sal de Epsom)	Purgante
Sulfato de sodio decahidratado (sal de Glauber)	Purgante
Tiosulfato de sodio	Agente fijador en el proceso fotográfico

Es característico de todas las sales formar cristales, que son la manifestación macroscópica del arreglo interno ordenado de sus átomos.

OTRAS SUSTANCIAS CONOCIDAS ANTES DE LA CONQUISTA

La sal común era apreciada por los antiguos mexicanos. Se dice que su carencia fue motivo de guerra entre aztecas y tlaxcaltecas.

Entre otras sales conocieron también el alumbre, la mica, el yeso y la calcita, con las que fabricaron colorantes, recubrieron muros y labraron columnas. Respecto a las piedras preciosas, trabajaron la turquesa, el jade, el azabache, el ojo de gato, el rubí y el ámbar. Los dignatarios aztecas usaban, en forma exclusiva, piedras preciosas verdes de fluorita (fluoruro de calcio), mineral del que México sigue siendo primer productor mundial.

El cristal de roca (cuarzo) fue bellamente trabajado en el México antiguo. En Monte Albán, Oaxaca, se encontraron copas, orejeras y cuentas de este material. Se piensa también que son mixtecas las calaveras de cristal de roca del Museo del Hombre en París y del Británico de Londres.

Su cerámica era poco técnica, pero muy artística. Los olleros de Tlaxcala, a juicio de Gómara, hacían tan buena loza como la que había en España. Un buen número de minerales servía para la elaboración de colores para pintura, especialmente los óxidos de hierro, el negro de humo y las arcillas mineralizadas. El color rojo que obtenían de la cochinilla (*nocheztli*), o sangre de tunas, fue exportado a todo el mundo por los españoles y utilizado durante siglos.

El barro y el adobe fueron materiales comunes de edificación en las más antiguas construcciones del valle de México (el cerro del Tepalcate y la pirámide de Cuicuilco). Los aztecas obtenían una especie de *cemento* al mezclar la cal con una arcilla negra. Por otra parte, los muros de las casas de Moctezuma estaban revestidos con jaspe, una variedad cristalina del cuarzo, de muy diversos colores.

CUADRO 2. Los metales en el México antiguo.

<i>Metal</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Aplicaciones</i>
Oro	Au	Los mexicanos llamaban a este elemento <i>teocuitlat</i> (excremento de los dioses). Por su color y belleza era considerado el símbolo del Sol. Se extraía, por ejemplo, de los ríos de Oaxaca y Veracruz

Plata

Ag

Fue utilizada para hacer adornos, tanto sagrados como para los nobles. Se la encontraba en estado nativo en las arenas de los ríos. No obstante, se explotaba en yacimientos de Pachuca, Taxco y Zumpango. Los objetos de plata abundaban en el mercado de la gran Tenochtitlan.

Cobre

Cu

Tuvo múltiples usos. Los zapotecas lo incluían en monedas y hachas. Los mayas en cascabeles, como ornamento dedicado al dios de la muerte. Se han hallado palas de cobre de los agricultores aztecas.

Estaño

Sn

Se obtenía y trabajaba en Taxco y se vendía en el mercado de Tenochtitlan. Del cenote sagrado de Chichén Itzá se extrajeron objetos de metal.

Mercurio

Hg

Varios gramos de mercurio nativo se hallaron en una tumba maya en Copán (Honduras). Este metal fue conocido por los indígenas de Chilapa y, tal vez, por los de Temascaltepec (Estado de México).

Plomo

Pb

A pesar de su poco uso, se le ha encontrado como parte de aleaciones. Se vendió en Tenochtitlan con el nombre de *tenetztlī* (piedra de luna).

Hierro

Fe

Lo conocieron por formar parte de meteoritos, y aparentemente no se utilizaba.

Para construir armas emplearon el vidrio volcánico (obsidiana) y extraían diversas resinas (incluido el hule) que empleaban como pegamentos en la pintura y la medicina.

Los aztecas producían varios tipos de tejidos. El más común era el *hequen*, fabricado con las fibras de magueyes y agaves. La clase alta empleaba vestidos de algodón blanco. Hacían papel con la corteza del árbol *amatl*.

El azúcar, que obtenían por evaporación del aguamiel, la usaban en su alimentación, lo cual era un lujo en la Europa de aquella época. También conocían la fermentación, por medio de la cual fabricaban el pulque.

Respecto a los metales, los aztecas conocían los siete elementos de los alquimistas (oro, plata, cobre, estaño, mercurio, plomo y hierro; véase el cuadro 2). Se ha insistido en que sólo trabajaban los metales nativos, o sea que nunca alcanzaron la edad del hierro, ya que este metal lo encontraron únicamente en meteoritos. Sin embargo, según Humberto Estrada, un hacha hallada en Monte Albán, con 18% de hierro, prueba lo contrario.

La herbolaria se desarrolló enormemente en el México precortesiano. Los aztecas curaban sus males con plantas medicinales. En 1555, un médico indígena de Xochimilco, Martín de la Cruz, recopiló en un libro los medicamentos empleados por los mexicas (véase la figura 4). Este libro, con material gráfico excepcional, apareció en 1925 en la Biblioteca del Vaticano, después de siglos de aparente pérdida.



Figura 4. El libro sobre herbolaria medicinal mexicana de Martín de la Cruz es un importante legado para la botánica y la medicina tradicionales. Todavía en años recientes, su estudio permitió al grupo del doctor José Luis Mateos, en el IMSS, encontrar el principio activo del *cihuapahtli* o zoapatle. De la Cruz cita que este vegetal se empleaba para facilitar el parto. Las investigaciones ratificaron que el zoapatle contiene un

poderoso ocitósico (provoca la contracción del útero). Toda la sabiduría contenida en este libro fue heredada por los químicos orgánicos mexicanos de este siglo, que han sobresalido en el terreno internacional con sus investigaciones sobre productos naturales. (Ilustración tomada de Elías Trabulse, *Historia de la ciencia en México. Siglo XVI, FCE, 1983.*)

LA QUÍMICA EN LA COLONIA

Cierto es que la llegada de los españoles alentó la producción en beneficio de la metrópoli, pero también rigió la formación y desarrollo de la Nueva España. Por muchos años se asentó aquí el liderazgo en diversas ramas de la mineralogía.

La primera industria original de nuestro país se creó en Pachuca en 1555, gracias al genio de Bartolomé de Medina. Su proceso de recuperación de la plata por amalgamación con mercurio ha sido calificado por Bargalló como "el mejor legado de Hispanoamérica a la metalurgia universal". La formación de la amalgama de los metales preciosos con el mercurio permite su extracción en frío, proceso mucho más barato que el de la fundición. Posteriormente, hacia 1758, este proceso metalúrgico fue modificado por el clérigo minero Juan Ordóñez y Montalvo, a partir de un método de amalgamación en caliente, desarrollado en Perú. Irónicamente, una misión alemana intentó introducir esta técnica en 1786 a México, indicando que *acababa* de ser descubierta en Austria por el barón De Born.

Un vasco, Fausto de Elhuyar, se encargó del Real Cuerpo de Minería de la Nueva España en 1792. Diez años antes había descubierto el elemento químico llamado hoy tungsteno, al que bautizó como wolframio (por eso su símbolo químico es W). Elhuyar fue el primer profesor de química en México. El libro de texto que empleaba era el *Tratado elemental de química*, (1789) de Antoine Laurent Lavoisier; el creador de la química moderna. Esta obra fue traducida al español, en México en 1797, un año antes que en España.

Dentro del Real Cuerpo de Minería, Andrés Manuel del Río destacó por su trabajo de análisis químico de minerales mexicanos. En 1801, como resultado del estudio de un mineral de Zimapán, Del Río descubrió un elemento químico más, al que llamó eritronio. Posteriormente lo convencieron de que había confundido al eritronio con el cromo (Cr), lo que resultó falso. El metal fue redescubierto en 1830 por Sefstrom, quien lo denominó vanadio (V), como lo conocemos hoy.

En realidad, la primera aportación americana a la tabla de los elementos fue el platino (Pt), que era conocido por los indígenas de Sudamérica y fue presentado al mundo científico en 1748. Salvo esta contribución prehispánica, el eritronio (vanadio) fue el primer elemento químico descubierto en América. Habrían de pasar 125 años para descubrir el siguiente, en un laboratorio de Estados Unidos.

METALES Y NO-METALES

Hacia mediados del siglo XIX, gracias al hallazgo de un buen número de elementos y a la aceptación que había logrado la teoría atómica de Dalton, surgió la llamada *clasificación periódica de los elementos*, realizada por Mendeleiev en 1869.

	GRUPO															
	1	2	13	14	15	16	17	18								
1	1 H							2 He								
2	3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne								
3	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar								
4	19 K	20 Ca	Metales de transición	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr							
5	37 Rb	38 Sr		49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe							
6	55 Cs	56 Ba		81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn							
7	87 Fr	88 Ra														

Figura 5. Tabla periódica corta. Los cuadros en blanco corresponden a los metales. El mexicano Del Río descubrió el metal de transición llamado hoy vanadio. Los no-metales se presentan con pantalla oscura. En la zona fronteriza (pantalla clara) están los elementos que presentan propiedades de ambos conjuntos: los elementos anfotéricos.

De acuerdo con la similitud de sus propiedades, los 92 elementos se arreglan en filas y columnas de la tabla periódica. En la parte izquierda e inferior de la tabla se encuentran los *metales* y en la superior derecha los *no-metales*. Sus propiedades pueden consultarse en el cuadro 3.

CUADRO 3. Características de metales y no-metales.

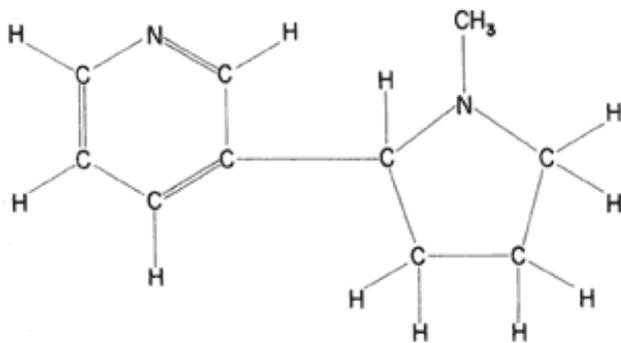
<i>Propiedades</i>	<i>Metales</i>	<i>No-metales</i>
<i>Propiedades químicas:</i>		
Al reaccionar con agua, sus óxidos forman	Bases	Ácidos
Sus iones son generalmente	Positivos	Negativos
<i>Propiedades físicas:</i>		
Apariencia	Brillantes	Opacos
Conducción del calor y la electricidad	Buenos conductores	Malos conductores
Deformaciones y rupturas de los sólidos	Pueden deformarse sin romperse	Quebradizos, se rompen fácilmente

Antes del movimiento de independencia, para ser precisos en 1803, recorrió México el ilustre barón alemán Alejandro de Humboldt, quien describió con lujo de detalle la vida y costumbres del México de aquella época. Respecto al comercio del jabón, que fuera introducido al país con la llegada de los españoles, menciona: En Puebla, México y Guadalajara, la fabricación de jabón sólido es objeto de comercio considerable. La primera de estas fábricas produce cerca de 200 000 arrobas al año [más de 17 000 kilogramos]. En la intendencia de Guadalajara se cuentan por el valor de 260 000 pesos. Favorece mucho a esta fabricación la abundancia de sosa, que se encuentra casi por todas partes en la meseta interior de México, a 2 000 o 2 500 metros. El tequesquite cubre la superficie del terreno sobre todo en el mes de octubre, en el valle de México, en las orillas de los lagos de Texcoco, de Zumpango y de San Cristóbal; en los llanos que rodean a la ciudad de Puebla; en los que se extienden desde Celaya hasta Guadalajara... Ignoramos si se debe su origen a la descomposición de las rocas volcánicas o a la acción lenta de la cal sobre la sal. En México, por 62 pesos se compran 1 500 arrobas de tierra tequesquitosa, una tierra arcillosa impregnada de mucho carbonato y de un poco de sal. Estas 1 500 arrobas, purificadas en las fábricas de jabón, dan 500 arrobas [43 kg.] de carbonato de sodio puro.

Después de que Iturbide asumiera el poder, se creó la Sección de Farmacia dentro del Establecimiento de Ciencias Médicas. En ella laboró Leopoldo Río de la Loza, un mexicano ilustre que nació en la capital de la República en 1807. Allí obtuvo los títulos de cirujano y farmacéutico, y el diploma de médico. Es autor del primer tratado mexicano de química; que lleva el título de *Introducción al estudio de la química* (1849-1862).

Río de la Loza fue, por muchos años, profesor de química y estudió los productos naturales existentes en diversos vegetales mexicanos. En uno de ellos halló el ácido pipitzahico, descubrimiento que lo hizo merecedor de un importante premio internacional. Fundó la Sociedad Farmacéutica, cuyo principal objetivo fue la edición de la *Farmacopea Mexicana*, que consta de multitud de sustancias y preparaciones curativas utilizadas en el país.

En esa misma época, cuando la química orgánica daba sus primeros balbuceos como ciencia, un mexicano llamado Vicente Ortigosa trabajó en Europa, donde aisló y analizó el alcaloide del tabaco, la nicotina, al que le dio la fórmula $C_{10}H_{16}N_2$, a partir de los resultados del porcentaje presente de cada elemento: **C= 73.355%**, **H= 9.6%** y **N= 17.1%**. Los análisis más modernos informan la siguiente composición: **C= 74%**, **H= 8.7%** y **N= 17.3%**. Vemos que los resultados de Ortigosa son sumamente buenos para su época.



Fórmula 1. Fórmula desarrollada de la nicotina, el alcaloide del tabaco.

A su regreso a México, Ortigosa no continuó con su trabajo, lo cual quizá se debió a una ausencia total de

infraestructura para realizar investigación.

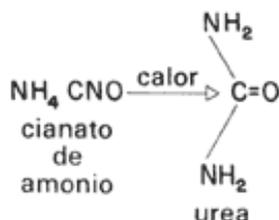
Gracias a la fundación del Instituto Médico Nacional, en 1888, se amplió la investigación de las plantas mexicanas y se analizó la posibilidad de fabricar medicamentos en gran escala.

QUÍMICA ORGÁNICA E INORGÁNICA

De forma muy general, se acepta que *la química es el estudio de las sustancias, su estructura, su composición y las transformaciones en las que intervienen*. Ahora bien, por razones históricas se acostumbra dividir las sustancias en dos grandes grupos: las orgánicas y las inorgánicas. De esta manera, tradicionalmente se ha hablado de la existencia de *dos químicas*, la orgánica y la inorgánica.

Aunque muchas sustancias orgánicas, como el azúcar, el vinagre o el alcohol, han sido conocidas desde la Antigüedad, fueron aisladas por primera vez en el siglo XVIII. En esa época, este tipo de compuestos se obtenía por la acción de los seres vivos. Por ejemplo, el ácido láctico fue aislado de la leche por Scheele (1742-1786), quien demostró que su presencia es la causa de que la leche se agrie. Juan Jacobo Berzelius propuso que los compuestos orgánicos sólo podían obtenerse por la acción de la *fuera vital* y que por lo tanto existían dos tipos de compuestos en la naturaleza: los materiales inorgánicos, presentes aun en ausencia de vida, y los orgánicos, reservados para la materia animada.

Poco le iba a durar el gusto a Berzelius, pues en 1828 el químico alemán Federico Wöhler preparó urea (que se sabía era un producto de desperdicio de los seres vivos) a partir de una sal inorgánica llamada cianato de amonio.



Fórmula 2. Reacción de Wöhler. Primera muestra de que no sólo dentro de los organismos vivos pueden realizar transformaciones de sustancias inorgánicas en orgánicas.

A pesar de lo arbitrario de la clasificación, ésta persiste hasta nuestros días. Hoy se llama química orgánica a la relacionada con los compuestos que contienen carbono (salvo algunas excepciones, como los óxidos de carbono o los carbonatos). Como veremos en el siguiente capítulo, el carbono es un elemento peculiar. Existen tantos compuestos de carbono que conviene estudiarlos en *paquete*. No obstante, hay que subrayar que la química es única. Los compuestos orgánicos e inorgánicos también reaccionan entre sí. Una rama moderna de la química, la organometálica, se encarga del estudio de un tipo de compuestos que no podríamos clasificar dentro de ninguna de las dos químicas tradicionales.

LA CREACIÓN DE LA PRIMERA ESCUELA DE QUÍMICA

Durante este siglo, la ciencia central ha prosperado notablemente en México. Sin embargo, su desarrollo no ha sido espectacular, sino más bien moderado. Tal vez sea la más rezagada de las ciencias básicas.

A principios de siglo, la incipiente industria se reducía a la producción cervecera, minera, de azúcar, de hilados y tejidos, así como de algunos productos farmacéuticos. El pavoroso dato de un 80% de analfabetismo en el país reflejaba el atraso cultural e intelectual generalizado. La fuga de técnicos extranjeros, debida al inicio del movimiento revolucionario y a la primera Guerra Mundial, marcaba la urgente necesidad de formación de personal especializado.

Desde luego, poco puede prosperar una ciencia sin la existencia de un semillero de científicos y técnicos. Para la química, esta fecha llegó en septiembre de 1916. Por iniciativa de don Juan Salvador Agraz, a la mitad del movimiento revolucionario se creó la Escuela Nacional de Química Industrial (hoy Facultad de Química), que en febrero de 1917 se incorporó a la UNAM.

La idea de Agraz era "instalar los cursos de peritos químicos industriales [...] obreros químicos y pequeños industriales, y a los ingenieros químicos y doctores en química". Este último programa no pudo arrancar sino décadas después, pero hay que destacar que Agraz fue un gran visionario que apreció la necesidad de complementar la formación de profesionales con la de investigadores químicos. Ésta es la manera correcta de formar personal técnico que vaya más allá de la simple actitud imitativa y dependiente. Fue una desdicha que, por falta de fondos, el doctorado no haya podido iniciarse entonces.

Hacia 1919 se anexa a la Escuela la carrera de farmacia, que hasta entonces se realizaba en la Escuela Nacional de Medicina. Pronto se crearon los laboratorios de análisis y el de preparación de productos químicos orgánicos e inorgánicos. Además, se instaló una planta de éter y se levantaron nuevos edificios destinados a las industrias orgánicas de fermentación, azúcares y almidones, tanantes y curtientes, y farmacéutica.

LOS PRIMEROS BECARIOS

Cuando José Vasconcelos ocupó la Secretaría de Educación Pública surgió la iniciativa de becar a los mejores alumnos para realizar estudios complementarios en Europa. Así, por acuerdo de la Presidencia, en 1921 se otorgaron las primeras diez becas para estudiar en diferentes universidades alemanas.

Durante la estancia de estos primeros becarios mexicanos de la química ocurrió en Alemania un hecho sin precedentes: la gran inflación. Mientras que en febrero de 1922 un dólar se cambiaba por 300 marcos, hacia mediados de 1923 el dólar llegó a valer cuatro billones de marcos. ¡Y resulta que las becas se pagaban en dólares! Antes de esta inflación, con menos de la décima parte de la beca se cubrían todos los gastos de estancia. Se cuenta que uno de aquellos becarios, Fernando Orozco (luego director de la Escuela y del Instituto de Química), vivía en un ala de un elegantísimo castillo alemán. ¡Qué contraste con los becarios de décadas más tarde!

Hacia 1924 estudiaban becados en Europa un total de 22 estudiantes mexicanos de química. Al año siguiente, casi todos regresaron al país en busca de un lugar donde aplicar los conocimientos adquiridos. Se encontraron con una ausencia total de la infraestructura necesaria para realizar investigación. Algunos se colocaron en industrias, a las que dieron una importante renovación; otros participaron de cerca en el desarrollo de la Escuela — que llevaba entonces el nombre de Escuela Nacional de Ciencias Químicas— y habrían de desempeñar un papel importante en su consolidación. Tal vez quien más sobresalió entre ellos fue el mismo Fernando Orozco que residió durante sus estudios en aquel castillo. Orozco, doctorado en la Universidad de Hamburgo en análisis inorgánico de metales, promovió la actualización de los planes de estudio y fue de los asesores de PEMEX que hicieron posible la producción del antidetonante de las gasolinias inmediatamente después de la expropiación, tema en el que profundizamos en el segundo capítulo.

Casi veinte años después de que se fundó la Escuela de Química se creó el Instituto Politécnico Nacional, y en él la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas.

En 1941 se creó en la UNAM el Instituto de Química, con fondos provenientes de la Casa de España y del Banco de México. El Instituto vino a llenar el vacío de investigación química que existió durante muchos años e hizo realidad el inicio de la formación de científicos de esta área en México. Su primer director fue don Antonio Madinaveitia, uno de los refugiados españoles que México acogió después de la guerra civil. Don Antonio participó también en el diseño del proceso que hizo factible el aprovechamiento de las aguas del lago de Texcoco para la fabricación de sosa cáustica y carbonato de sodio. Esta moderna *tecnología del tequesquite* se implantó en la empresa Sosa Texcoco en 1942.

Como relatamos más adelante, la especialidad del Instituto fue la química orgánica. En el año de 1947 se graduó allí el primer doctor formado en el Instituto. Se trataba de Alberto Sandoval Landázuri, quien luego lo dirigiría por dieciocho años. Otro egresado conspicuo de esos años fue José F. Herrán Arellano, quien fundó y fue primer director de la División de Estudios Superiores, hecho por el que la Escuela Nacional de Ciencias Químicas se transformó en la hoy Facultad de Química de la UNAM

Aunque han sido diversas y muy amplias las aportaciones de la química mexicana en este siglo, a manera de ejemplo relatamos a continuación cuatro de ellas.

LOS ANTICONCEPTIVOS ORALES Y LA CORTISONA

En la misma década de su fundación, el Instituto de Química habría de coparticipar en uno de los descubrimientos modernos más sobresalientes: la píldora anticonceptiva.

La historia empieza en 1943, cuando el estadounidense Marker descubre en México un vegetal, llamado "cabeza de negro", con alto contenido de diosgenina, una sustancia que Marker sabía transformar en progesterona (compuesto de la familia de los esteroides). Esta hormona es segregada por las mujeres durante el embarazo, lo cual inhibe la menstruación. Para industrializar su descubrimiento, Marker se asoció con dos mexicanos, Somlo y Lehmann, y creó la empresa Syntex.

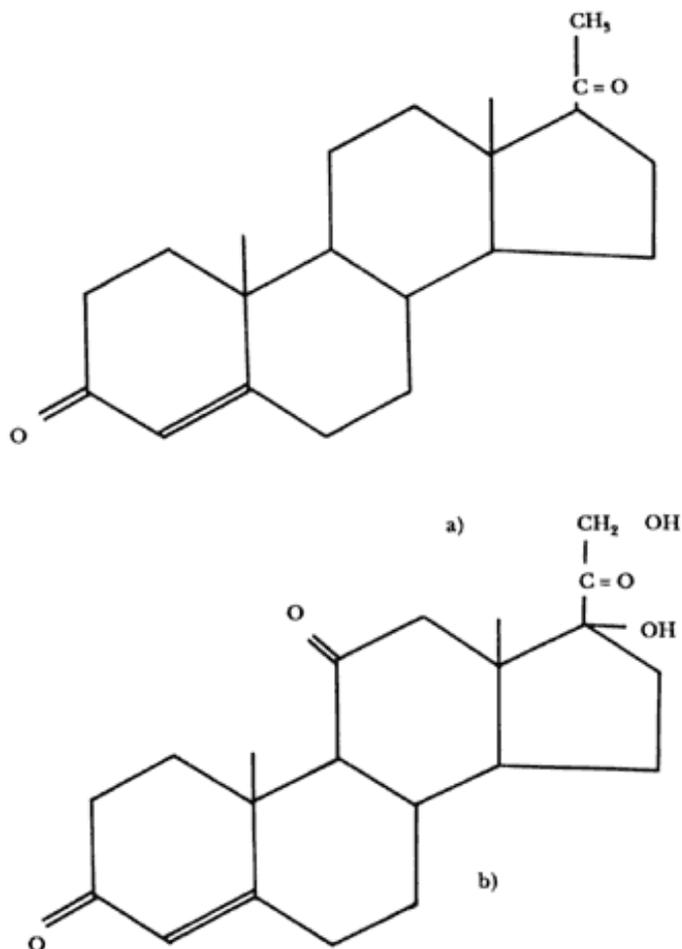


Figura 6. "La cabeza de negro" es un vegetal mexicano de raíz tuberosa que sirvió de materia prima para fabricar progesterona en los años cuarenta. Anteriormente, un gramo de esta sustancia costaba unos doscientos dólares. Cinco años más tarde, por los trabajos desarrollados en México, costaba sólo dos dólares. (Tomada del libro *Una corporación, una molécula*, Syntex, México, 1964.)

El éxito académico y comercial que tuvo la producción de hormonas en México fue espectacular. Hacia 1959, los científicos de Syntex habían publicado más artículos sobre esteroides que cualquier otra institución académica o industrial en el mundo. En cuestión de diez años, nuestro país, del que no constaba previamente ninguna contribución notable en química básica, se había transformado en uno de los centros mundiales de una rama especializada de la química orgánica.

Nos visitaron los más renombrados investigadores del mundo y se formaron en México importantes grupos de científicos.

Tal vez la labor más sobresaliente fue la del hidrocálido Jesús Romo Armería, investigador del Instituto de Química y de Syntex, quien participó en diversos proyectos de síntesis a partir de progesterona, los que culminaron en 1951 con la síntesis de la cortisona, que contiene tres átomos de oxígeno más, en posiciones cruciales, que la convierten en un eficaz antiinflamatorio y antiartrítico.



Fórmula 3. Si la posición de un o más átomos difiere de una molécula a otra, las propiedades de las sustancias pueden variar enormemente. Las fórmulas están escritas en una especie de *taquigrafía* química en la que se sobrentiende que en cada vértice existe un átomo de carbono con los hidrógenos necesarios. A) Fórmula molecular de la progesterona, la hormona del embarazo. B) Fórmula molecular de la cortisona, un potente antiinflamatorio.

Pocos años más tarde se produjeron en México los primeros antiovulatorios orales, que impiden que el óvulo abandone el ovario e interfieren por lo tanto en la gestación. Cinco años después, millones de mujeres en todo el mundo los estaban utilizando. Actualmente hay muy diversos tipos de antiovulatorios y sigue estudiándose cómo establecer la inocuidad de su empleo prolongado.

Por otra parte, Syntex fue vendida a una compañía estadounidense y se transformó en una corporación internacional. Hoy alcanza ventas anuales por más de mil millones de dólares. El centro de sus operaciones administrativas, de mercado y de investigación se ubicó en Palo Alto, California. En México continuó la fabricación de productos esteroidales intermedios, mientras que la de productos terminados se desplazó a Puerto Rico y las Bahamas.

EL INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

A raíz de la nacionalización del petróleo en 1938, las compañías extranjeras negaron la venta de tetraetilo de plomo (antidetonante de la gasolina, véase el capítulo II).



Fórmula 4. Tetraetilo de plomo. Aunque mejora el desempeño de las gasolinas, la presencia de plomo en este compuesto es un agente grave de contaminación. La mayoría de los metales pesados son tóxicos para los humanos.

Después de un primer intento fallido, los ingenieros químicos mexicanos lograron, con la tenacidad que inspiran los bloqueos, echar a andar una planta de tetraetilo que se instaló en el mismo lugar donde 27 años más tarde (1966) se crearía el IMP .

México no sólo es el quinto productor de petróleo crudo en el mundo, sino también el decimosegundo de productos petroquímicos. Hacia 1982 se encontraba entre los primeros cinco por el número de plantas en desarrollo, situación que empeoró debido a la escasa inversión de los años críticos posteriores.

En el Instituto se han diseñado cerca de 100 plantas petroquímicas y de refinación de petróleo. Sin embargo, no todo ha sido diseño. El IMP cuenta con más de 150 patentes con registro internacional, entre las que destacan las de procesos de hidrodesulfuración (eliminación del contaminante azufre de las gasolinas y el diesel) y de desmetalización selectiva de residuos pesados (conocido como proceso DEMEX), con plantas que trabajan en el país y el extranjero.

El aporte del Instituto al desarrollo nacional ha sido muy importante. En fecha reciente concluyó, por ejemplo, el estudio global de la calidad del aire en la zona metropolitana de la ciudad de México, que permite simular y valorar el efecto que sobre la contaminación por azufre, hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y ozono, tendría la aplicación de diversas medidas de control tales como algunos cambios en la composición de gasolinas y diésel, el efecto de las fuentes móviles y fijas, la eliminación de la refinería de Azcapotzalco, etcétera.

EL HIERRO ESPONJA

Tal vez la tecnología mexicana más conocida en el extranjero sea la que desarrolló la compañía Hojalata y Lámina (HYLSA) de Monterrey, respecto al llamado *hierro esponja*. Sobre dicha tecnología se informa en la *Encyclopedia of Chemical Technology*.

En 1957, un efecto de la guerra de Corea fue la elevación de los precios de la chatarra. HYLSA, que producía aeroplanos a partir de chatarra, hubo de iniciar un programa de investigación cuyo resultado fue el proceso de reducción directa del mineral de hierro. Una tecnología terciarmundista de primera línea.

Treinta años más tarde, cuando la producción mundial de hierro alcanza los mil millones de toneladas, la tecnología de HYLSA sigue siendo líder en el campo de obtención de hierro por reducción directa.



Figura 7. Aspecto del hierro esponja, mineral de hierro después de ser sometido al tratamiento de reducción directa (cortesía del doctor Gabriel Gojon, UANL.)

REDUCCIÓN Y OXIDACIÓN, PILARES DE LA QUÍMICA

El término *oxidación* se aplicó originalmente a la ganancia de oxígeno en un cambio químico. La formación de herrumbre a partir de hierro es una oxidación, lo mismo que cualquier combustión. Al proceso inverso, la pérdida de oxígeno, se lo llamó *reducción*.

Posteriormente, ambos términos fueron ampliados para incluir la ganancia o pérdida de hidrógeno o electrones (véase el cuadro 4).

CUADRO 4. Significado de oxidación y reducción

<i>Se oxida la sustancia o el átomo que</i>	<i>Se reduce la sustancia o el átomo que</i>
Gana oxígeno o pierde hidrógeno o pierde electrones	Pierde oxígeno o gana hidrógeno o gana electrones

En el proceso del hierro esponja, la proporción de oxígeno que se encuentra combinada químicamente con el hierro en el mineral se va reduciendo paulatinamente gracias a la acción de una mezcla de hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO), que se alimenta a $800^\circ C$. Ambas sustancias toman átomos de oxígeno del mineral (se oxidan) para formar H_2O y CO_2 . De esta manera, el óxido de hierro del mineral, $Fe_2 O_3$ se convierte en $Fe_3 O_4$, luego en FeO y finalmente en el elemento Fe. Es decir, el mineral de hierro se reduce (pierde oxígeno). El resultado es un hierro poroso, esencialmente con la misma forma y tamaño que la partícula del mineral, que es una magnífica *carga* para la elaboración de acero en un horno eléctrico, pues está libre de impurezas metálicas, es fácil de manejar y transportar y posee una composición química uniforme y precisa.

LA REVOLUCIÓN VERDE

En México se inició y desarrolló el proceso conocido como *revolución verde*, el cual permitió a Norman Borlaug ganar el Premio Nobel de la Paz de 1970, por sus descubrimientos en el campo de la agricultura.

Este proyecto, con influencia política pero esencialmente biológico y bioquímico, revolucionó la producción agrícola e influyó en la consolidación de importantes grupos mexicanos de investigación, como el del Centro Internacional para el Mejoramiento del Maíz y del Trigo (CIMMYT), el del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) y el del Colegio de Posgraduados de Chapingo.

En veinte años, la productividad de maíz por hectárea pasó de 975 a 1 770 kilogramos y la de trigo, de 1 417 a 3 480 kilogramos, lo cual constituyó un aporte que alivió en parte los problemas de escasez de alimentos y la desnutrición. Debemos tener presente que se hace necesario un importante apoyo financiero y tecnológico para lograr la generalización de este sistema en todo el país, dado que los problemas del campo siguen siendo muy graves.

Además de las citadas, son varias las instituciones nacionales que realizan investigación de carácter biológico y bioquímico, orientada al reino vegetal: la Facultad de Química de la UNAM, el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN de Irapuato y el Centro de Investigación Científica de Yucatán. Parte de la investigación se

orienta hacia el mejoramiento de las poblaciones vegetales para obtener mayor resistencia genética a las enfermedades y a las plagas, así como hacia el desarrollo de una mayor tolerancia a la sequía y el almacenamiento. Todo esto es de gran importancia en un país en el que el maíz y el frijol son la base de la alimentación, y donde 80% de la superficie cultivada depende de la lluvia como única fuente de humedad.

UN PROBLEMA GRAVE Y UNA ENORME POTENCIALIDAD

Después de presentar este panorama de la química mexicana, vale la pena resaltar las razones por las que el desarrollo de la ciencia central ha sido tan moderado.

Desde luego, la química comparte con otras ciencias una problemática común de financiamiento y ausencia de tradición, heredadas de nuestra condición de país tercermundista. De aquí se deriva la *tragedia* de la ciencia mexicana. Sin embargo, esta ciencia presenta una característica muy peculiar, ya que de ella ha derivado una de las industrias más dinámicas de la economía: la industria química. Esto representa una gran ventaja y potencialidad, pero también un grave problema.

Las aplicaciones de la química empezaron a darse aun antes de que ésta se estableciera como ciencia. Por ejemplo, la edad de hierro sólo pudo ocurrir mediante el aprendizaje de la transformación de los minerales en metales, pero ello tuvo lugar milenios antes del nacimiento de Lavoisier y Dalton. Así, el conocimiento empírico se adelantó grandemente al conocimiento científico, el cual es muy reciente. Con ello, mucha gente se contentó con el *saber hacer* sin importar mucho el *saber por qué*. Fueron pocos los países donde se utilizó la química para comprender todos esos hechos y técnicas producto de la experiencia acumulada. Muy pronto esos mismos países pudieron acoplar la investigación fundamental con la producción de nuevos bienes. Nosotros importamos la manera de hacerlos, pero no cultivamos ni trasladamos la forma de conocer cómo desarrollar otros.

Así, cuando en México se presentó el fenómeno de la industrialización, la química participó como una actividad técnica (más que científica) modelada por nuestro carácter dependiente. De esta manera, el ejercicio creativo de la química y la ingeniería química se restringió a los espacios académicos universitarios, en franca desconexión con la producción, ya que ésta no necesitaba de creatividad, pues surgió como una actividad refleja.

Este es el gran reto de la química en México: lograr que se realicen nuevos descubrimientos que luego transiten, en el tiempo necesario, de la mesa de laboratorio a la instalación industrial o al campo y de allí se conviertan en beneficio para la población. Es urgente que se deje de concebir a la química como una ciencia "para hacer cosas" y que se piense en ella "para conocer más cosas", que luego nos beneficien más.

Los pocos ejemplos citados deben repetirse con más frecuencia. Pero ello sólo se logrará cuando se adquiera total conciencia de la importancia capital que tiene para un país el desarrollo de la ciencia y de sus aplicaciones originales. Otro será el estado de este país cuando tengamos menos cosas que aprender y más que enseñar. Por ahora, seguimos aprendiendo...

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Bargalló, M., *La química inorgánica y el beneficio de los metales en el México prehispánico y colonial*, UNAM, México, 1966.

De Gortari, E., *La ciencia en la historia de México*, Fondo de Cultura Económica, México, 1963.

García Fernández, H., *Historia de una Facultad*, UNAM, México, 1985.

Garritz, A. y J. A. Chamizo, *Química*, Addison-Wesley Iberoamericana, Wilmington, 1994.

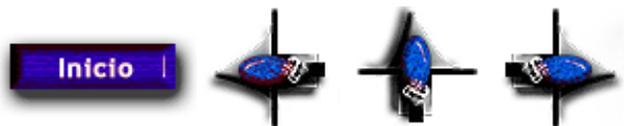
Hernández B., E. R., *Desarrollo de la química inorgánica en México y la contribución de la Facultad de Química en esa área*, trabajo monográfico, Facultad de Química, UNAM, 1986.

Siguiura, Y., "La ciencia y la tecnología en el México antiguo", *Ciencia y Desarrollo*, vol. 8, núm. 43, marzo-abril de 1982, pp. 113-141.

Syntex, *Una corporación y una molécula*, México, 1967.

Trabulse, E., *Historia de la ciencia en México*, Fondo de Cultura Económica, México, 1983.

Waissbluth, M. *et al*, "El desarrollo de la ciencia y la tecnología en México", *Ciencia y Desarrollo*, vol. 8, núm. 45, julio-agosto de 1982, pp. 27-83.



Inicio

II. EL PETRÓLEO Y SUS QUIMIDERIVADOS

LA VALENTÍA DE LA EXPROPIACIÓN

HACIA 1935 operaban en México alrededor de veinte compañías petroleras, todas ellas extranjeras salvo alguna excepción. Los primeros lugares en la producción eran ocupados por subsidiarias de la Royal Dutch Shell, la Standard Oil y la Sinclair.

El primer conflicto laboral de los trabajadores con las compañías extranjeras se presentó con la huelga de 1937, una vez que se había constituido el Sindicato de Trabajadores Petroleros de la República Mexicana. Durante esos días, en que dejó de surtir combustible a todo el país, la población adquirió conciencia plena de la importancia del petróleo. Las fábricas sin suficientes reservas comenzaron a detener actividades. Las máquinas agrícolas no tenían forma de trabajar. Las calles de la ciudad de México empezaron a verse semidesiertas. La fuerza y necesidad del energético se hicieron sentir en toda su magnitud.

Don Eduardo Suárez, quien participara en la solución del conflicto y fuera firmante del decreto expropiatorio como Secretario de Hacienda y Crédito Público, cita un dato que revela el provecho injusto que esas compañías sacaban de sus operaciones en México:

... mientras el precio en Nueva York de un barril de petróleo, en promedio, en el año de 1936, era de 3.19 dólares, la compañía mexicana de petróleo El Aguila se lo entregaba a su filial a 1.96 dólares. ¿Con qué objeto?, se preguntarán algunos. Sencillamente con el propósito de ocultar aquí las utilidades para reducir el pago del Impuesto sobre la Renta y trasladar parte de la contribución sobre utilidades a otro país. Así, revisando la contabilidad encontramos numerosas triquiñuelas.

El dictamen de la Junta Federal de Conciliación y Arbitraje en diciembre de 1937, confirmado el 1º de marzo de 1938 por la Suprema Corte, obligaba a las empresas a cubrir 26 millones de pesos a los trabajadores. Las compañías se negaron a pagar y adoptaron una posición soberbia, intransigente y retardadora frente a la máxima autoridad legislativa de la nación y ante el mismo Presidente, general Lázaro Cárdenas.

A pesar de las continuas y graves amenazas, y de las presiones económicas que las empresas impusieron sobre la paridad del peso con el dólar; que entonces se mantenía en 3.60 pesos, la expropiación se anunció por todas las estaciones radiofónicas el 18 de marzo de 1938. En el decreto, el gobierno se obligaba a pagar una indemnización a las empresas.

El hondo impacto que causó sobre la opinión pública no ha tenido repetición en los años subsecuentes. Puede decirse que todo México estuvo con el gobierno frente a las compañías petroleras. Cita Eduardo Suárez:

... el 12 de abril hubo una manifestación de mujeres frente al Palacio de Bellas Artes. Miles de mujeres de todas las clases sociales, desde la más humilde hasta las aristocratizantes, fueron a entregar su contribución para pagar la deuda petrolera. Algunas entregaron joyas valiosas, y otros objetos de valor escaso. Hubo una viejecita de la clase humilde que llevó una gallina, la cual seguramente representaba una buena parte de su exiguo patrimonio. Actos ingenuos y conmovedores, pero de todos modos dan idea de lo que en momentos difíciles somos capaces de realizar los mexicanos.

EL PROBLEMA TÉCNICO DESPUÉS DE LA EXPROPIACIÓN

El 19 de marzo se presentó un problema esperado, pero no por ello menos pavoroso. Todos los técnicos de las compañías expropiadas habían abandonado el país y no existía un solo buque-tanque en nuestros puertos. En realidad, apenas se había iniciado la batalla de las empresas contra México.

El boicot establecido por las empresas extranjeras expropiadas fue de una magnitud enorme, pues pesaba una amenaza sobre todas las compañías que hubieran podido comprarnos petróleo o vendernos maquinaria, refacciones o materia prima (como el tetraetilo de plomo, que ya citamos en el capítulo anterior), indispensables para la industria petrolera.

Fue necesario un esfuerzo titánico para no dejar al país sin combustible. Los actos heroicos se dieron tanto en las fábricas como en la distribución de los productos. Afortunadamente, las dificultades técnicas fueron vencidas con gran oportunidad. Mucho tuvieron que ver en ello los profesionales de la química que habían empezado a formarse en el país desde 1916. A los 22 años de su creación, la Escuela Nacional de Ciencias Químicas empezaba a cubrir con eficiencia la necesidad de químicos e ingenieros químicos que la nueva industria nacionalizada requería.

FORMAS ALOTRÓPICAS DEL CARBONO

Un mismo elemento puede presentarse de diversas formas en la naturaleza, y no nos referimos precisamente a que pueda encontrárselo gaseoso, líquido o sólido, sino a las diferentes formas que adquiere un elemento aun en un mismo estado de agregación —por lo general el sólido—. A éstas se las denomina *formas alotrópicas* y este fenómeno se conoce como *alotropía*.

De nuestro *formador de cadenas*, el carbono, existen dos *alótropos* ampliamente conocidos: el diamante y el grafito. La existencia de ambos demuestra que las propiedades de las sustancias no dependen sólo de los átomos que las constituyen, sino también de cómo se encuentran arreglados.

El grafito de un lápiz y el diamante de una joya sólo contienen átomos de carbono, pero ¡qué diferentes son ambos sólidos! El grafito es negro, brillante, quebradizo y buen conductor de la electricidad, mientras que el diamante es transparente, aislante eléctrico y tan duro que permite cortar vidrio o bloques de granito. A pesar de las diferencias tan notables, si se calienta un diamante hasta **1 800°C**, lentamente se convierte en grafito, que es el alótropo más estable. A la inversa, al aplicar presiones enormes, pequeñísimas muestras de grafito han podido transformarse en diamante.

Recientemente se han detectado otras dos formas alotrópicas del carbono, no tan conocidas como las anteriores: el carbón VI y los fullerenos. El primero está constituido por una larga cadena de átomos de carbono en los que se alternan triples enlaces y se lo ha encontrado en meteoritos y en almacenamientos terrestres de grafito. Por su parte, los fullerenos han sido la novedad científica de la segunda mitad de los años ochenta; su síntesis se logró en 1985 mediante la evaporación del grafito por medio de un rayo láser. Uno de los fragmentos formados tenía 60 átomos de carbono y se encontró que poseía una estructura simétrica cuasiesférica, muy parecida al balón de fútbol, con pentágonos y hexágonos alternados. Más tarde aparecieron otras moléculas con 28, 32, 50, 70, 76 y 84 carbonos. Al alótropo más abundante, el **C₆₀**, se lo conoce de manera informal como *futboleno*, aunque formalmente todas estas formas llevan el nombre de *fullerenos* en honor a Buckminsterfuller, arquitecto inventor del domo geodésico, que tiene una estructura similar.

EL DILEMA SOBRE LA TRANSFORMACIÓN QUÍMICA DEL PETRÓLEO O SU EMPLEO COMO ENERGÉTICO

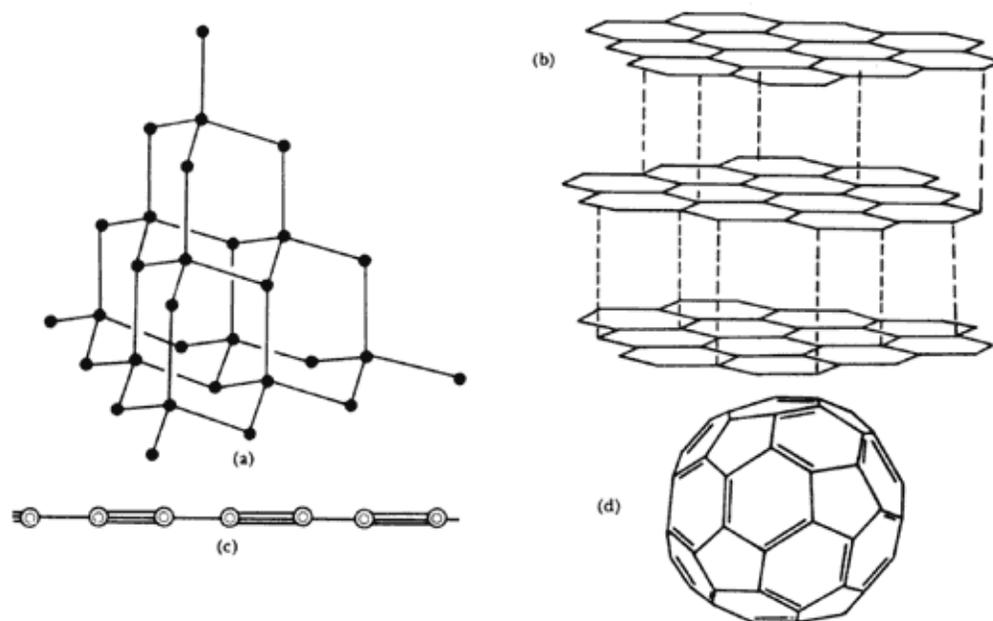
Desde que México tuvo en sus manos las decisiones sobre la industria petrolera fue factible aprovechar esta materia prima en forma más racional y eficaz. No obstante, parece que aún se debate cómo hacerlo con el mayor provecho para la nación. Leopoldo García-Colín, uno de los científicos más destacados de nuestro país; ha dicho que "la tragedia más grande que le puede ocurrir a un país productor de petróleo es pensar que éste debe destinarse esencialmente a satisfacer sus demandas energéticas".

En efecto, resulta un desperdicio no transformar los componentes del petróleo para generar otros materiales, con mucho más valor agregado. La venta masiva de petróleo crudo sin procesar sigue el esquema que caracteriza a los países subdesarrollados: exportar materia prima e importar productos elaborados. En un libro de esta misma colección, *Petroquímica y sociedad*, Susana Chow compara elocuentemente el aprovechamiento energético del petróleo con el de la madera:

¿Qué pensarían si se les propusiera talar todos los bosques del mundo, para transformar sólo el 7% de la madera en muebles y papel, y el resto convertirlo en leña y carbón? ¡Pues esto es lo que se está haciendo actualmente con el petróleo y el gas natural!

Ya veremos que este problema no es privativo de México. En esencia, la utilización del petróleo es de orientación energética. Este mundo nuestro es un consumidor empedernido de energía. En este sentido, urge desarrollar fuentes alternas energéticas de consumo generalizado y guardar el petróleo para emplearlo en mejores fines, ya que pronto será escaso.

A pesar de los esfuerzos ya realizados, algunos de los cuales comentamos a lo largo de este capítulo, nuestro país debería adoptar un programa más enérgico de desarrollo e investigación de la petroquímica, la ciencia de las transformaciones químicas del petróleo.



Fórmula 5. Cuatro alótropos del carbono y sus estructuras cristalinas: a) diamante; b) grafito; c) carbono VI, y d) futboleno, C_{60} .

PEMEX, FRUTO DE LA EXPROPIACIÓN

PEMEX, la industria estatal del petróleo desde 1940, orienta actualmente sus recursos a cuatro zonas prioritarias:

- a) Chiapas-Tabasco.
- b) Sonda de Campeche
- c) Paleocañón de Chicontepec
- d) Cuenca de Sabinas

En la actualidad, más de la mitad de la extracción se logra en la Sonda de Campeche, en la que los pozos están montados en más de cien plataformas sobre la superficie marina. Como dato curioso, el descubrimiento de esa enorme riqueza petrolífera tuvo lugar cuando un pescador, Rudecindo Cantarell, mientras pescaba camarón, vio unas manchas aceitosas en la superficie, que provenían de una chapopotería que liberaba petróleo en el mar, a cincuenta metros de profundidad.

Las reservas probadas del petróleo mexicano ascienden a cerca de 65 mil millones de barriles, según se informó en marzo de 1993, a 55 años de la expropiación.

PEMEX es la industria más importante del país, pues su contribución a la economía es esencial. Sus autoridades han informado que el petróleo surte 90% de la energía, más de 40% de las divisas que se captan del extranjero, y aporta alrededor de 30% de los ingresos fiscales. A 55 años del decreto expropiatorio, su mayor ingreso sigue siendo, con mucho, la venta de petróleo crudo. La producción en 1992 fue de casi 2 700 000 barriles diarios (un barril equivale a 159 litros), de los cuales exportó casi 1 400 000. De dicha exportación más la de gas y productos petroquímicos, PEMEX generó ingresos por 11 700 millones de dólares, y egresos por 4 900, de tal manera que su balanza de divisas fue positiva por un total de 6 800 millones de dólares.

Desde 1992, PEMEX es un corporativo que se compone de cuatro organismos descentralizados:

PEMEX-Exploración y Producción

PEMEX-Refinación

PEMEX cubre buena parte de la producción petroquímica mexicana. Actualmente produce 45 petroquímicos, de los cuales comercializa 35, que obtiene en 19 centros productivos. En 1992, la producción de *PEMEX-Petroquímica* fue de 13 700 000 toneladas, o sea, ¡unos 170 kilogramos por habitante!

LOS PRODUCTOS PETROQUÍMICOS, COMO SI FUERAN JOYAS

Imagine el lector que el carbón pudiera transformarse a bajo costo en diamante, lo cual es factible desde el punto de vista técnico, pues ambos están constituidos exclusivamente por átomos de carbono. E imagine también que ello no alterara el valor del diamante, y que México se dedicara sistemáticamente a exportar carbón para que fuera procesado por otros países para fabricar diamantes y obtener estratosféricas ganancias. ¿Habría algún argumento para hacerlo y no montar aquí inmediatamente plantas productoras de diamantes?

Algo así sucede con el petróleo. Su transformación química permite obtener una enorme diversidad de productos muy valiosos: los petroquímicos. No obstante, por diversas razones económicas, casi 1 500 000 barriles de petróleo crudo salen diariamente de nuestros puertos. ¿Puede el amable lector imaginar el diámetro de una tubería y el flujo volumétrico que son necesarios para que circulen diariamente a través de ella 240 millones de litros? Tal vez baste decir que se requeriría llenar unas ¡6 000 pipas! para contener todo este líquido. Si éste fuera el mecanismo de transporte del petróleo de exportación, estas 6 000 pipas se tendrían que llenar diario con el crudo del subsuelo, formar una fila india de 60 kilómetros de largo, y ser vertidas en los buque-tanques que viajan hacia otros países.

Resultado de la crisis económica de los años ochenta fue también la disminución de las inversiones productivas. Sin embargo, en años recientes PEMEX ha vuelto a invertir, principalmente en la instalación de plantas para reducir problemas ecológicos. Por ejemplo, PEMEX-Refinación estuvo desarrollando en 1993, 17 nuevas plantas con una inversión cercana a los 1 100 millones de dólares.

Si bien es cierto que en 1982 México llegó a depender en 77.6% de las exportaciones de crudo (que resultaba una cifra escandalosa), no obstante, debido a la caída de los precios del barril y al crecimiento de las exportaciones manufactureras, esa relación se ha modificado (71.8% en 1983, 68.6% en 1984, 68.2% en 1985, 39.3% en 1986 —al entrar México al GATT— y en la actualidad se encuentra por debajo del 30%). Afortunadamente, las exportaciones se han diversificado. Los ingresos por concepto de petróleo crudo se redujeron drásticamente de 16 600 millones de dólares en 1984, a 6 300 en 1986 y fueron de 7 400 en 1992. Tal vez ahora que se reduce la tendencia a la monoexportación sea un buen momento para procesar el crudo que somos capaces de extraer.

A continuación, como este libro pretende informar y divulgar la ciencia central y crear conciencia de su necesidad, iniciamos un somero relato sobre cómo se obtienen y para qué son útiles los materiales petroquímicos.

ORÍGENES

La palabra petróleo es una castellanización del latín *petroleum* (de *petra* piedra y *oleum* aceite). Nuestros antepasados aztecas y chichimecas lo conocieron y lo denominaron *chappotli* o *chapototli* (del náhuatl *chiahuatl* = grasa y *potli* humo).

La formación del petróleo se entiende hoy como una serie compleja de procesos geoquímicos ocurridos a lo largo de una centena o dos de millones de años. Su origen se debe a la lenta descomposición de la materia orgánica acumulada en cuencas marinas y lacustres, en un pasado remoto. El proceso de sedimentación y enterramiento propició los procesos químicos a altas presiones y temperaturas que dieron como resultado el aceite crudo y el gas natural, dentro de un ambiente rocoso. En ocasiones, estas acumulaciones profundas de petróleo adquieren altísimas presiones y encuentran fracturas o grietas por las cuales el aceite emigra hacia la superficie.

Originalmente, en México se encontró petróleo a flor de tierra, en las llamadas *chapoteras naturales* u *ojos de aceite*. Los usos que los nativos dieron al aceite crudo son bien conocidos. Sin embargo, es hacia fines del siglo XVII cuando la humanidad se percató de su valor real y se inicia su explotación en formas diversas y rudimentarias. El primer pozo petrolero del mundo se perforó en Estados Unidos en 1859.

A partir de esa fecha se inicia la etapa de la exploración en México. Los pioneros desarrollaron sus esfuerzos basándose en la presencia de chapoteras, pero les faltó el equipo necesario para seguir adelante. Los ojos de aceite volvieron a llamar la atención desde el inicio del siglo XX, cuando la primera compañía extranjera compró un terreno de 118 000 hectáreas que abarcaba parte de los estados de San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz. El dueño de la hacienda quería venderla "porque

esos ojos de petróleo resultan un problema para la ganadería". Curiosamente, por la venta le ofrecieron el triple de la suma que pedía (300 000 pesos), por lo que accedió inmediatamente a ese "buen negocio". Desde luego, una fuerte compañía era la que había hecho esta oferta, la Huasteca Petroleum Company. En abril de 1904, después de una perforación de poco más de 500 metros, el pozo La Pez Núm. 1 lanzó el primer gran chorro de petróleo y empezó a producir unos 1 500 barriles diarios.

HIDROCARBUROS

Los componentes esenciales del petróleo son los *hidrocarburos*. Reciben el nombre genérico de hidrocarburos las sustancias químicas compuestas solamente por dos tipos de átomos: carbono e hidrógeno. A pesar de esta limitante, el número de los hidrocarburos existentes es enorme. Son los compuestos orgánicos más sencillos.

Debido a que están constituidos por esos dos elementos, su fórmula general puede escribirse como:



donde los números enteros n y m representan el número de átomos de cada elemento que contiene la molécula de un hidrocarburo dado.

Los químicos pioneros del siglo pasado, basados en el *análisis químico* —que permite conocer los elementos presentes en un compuesto, así como la proporción en que se encuentran— fueron capaces de reconocer que el carbono tenía una *capacidad de combinación* de cuatro. Es decir, que en muchos compuestos de carbono este átomo se enlaza químicamente con otros cuatro átomos vecinos. En la *jerga* química se dice que el carbono es *tetravalente*, o que su *valencia* es cuatro.

La razón por la que existen tantos hidrocarburos es la facilidad que tienen los átomos de carbono para enlazarse entre sí, formando cadenas moleculares. De esta manera, por lo menos uno de los cuatro enlaces de cada carbono se establece con otro átomo de carbono vecino. En los hidrocarburos, el resto de los enlaces corresponde a uniones carbono-hidrógeno.

Por tratarse de un elemento excepcional que fácilmente se enlaza consigo mismo, la química del carbono merece estudio aparte: la química orgánica. El número de compuestos orgánicos conocidos es enorme (véase el cuadro 5).

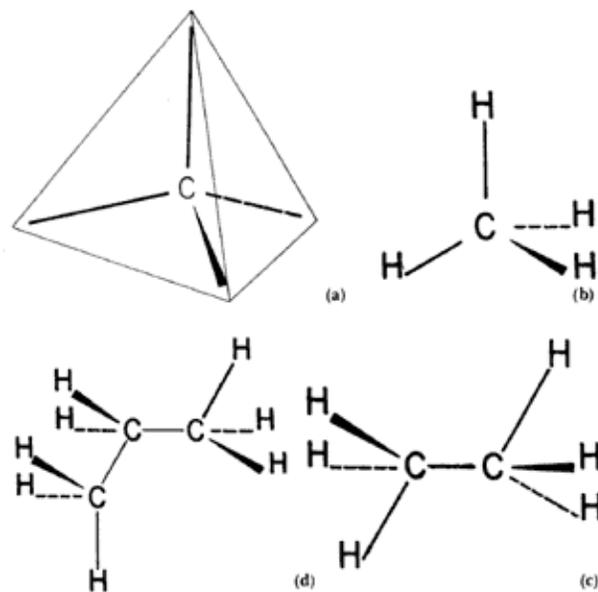
CUADRO 5. Crecimiento del número de compuestos orgánicos conocidos.

<i>Año</i>	<i>Número aproximado de compuestos</i>
1880	12 000
1910	150 000
1940	500 000
1960	1 000 000
1970	2 000 000
1980	5 500 000

(Tomado de M. Freemantle, *Chemistry in Action*, Macmillan, 1987.)

LA EXTRACCIÓN DEL PETRÓLEO CRUDO

El petróleo es una endemoniada mezcla de multitud de hidrocarburos gaseosos, líquidos y sólidos. Aunque en menor proporción, puede contener también otros compuestos con elementos diferentes del carbono e hidrógeno, tales como oxígeno (O), azufre (S), nitrógeno (N) y hasta algunos metales, como vanadio (V), níquel (Ni) o hierro (Fe).



Fórmula 6. a) Tetravalencia del carbono. Este átomo se liga con otros cuatro por medio de enlaces que apuntan hacia los vértices de un tetraedro. Se acostumbra colocar una cuña al enlace que apunta hacia fuera del plano del papel y una línea punteada para el que sale hacia atrás.

El petróleo no existe en el interior de la corteza terrestre como en una alberca, sino que llena los poros de ciertas rocas.

Debido a la presión a la que se encuentra sometido el petróleo, en cuanto la perforación del pozo llega al manto petrolífero fluye a través de los poros de las rocas y sube por la tubería. Conforme se extrae el petróleo, la presión disminuye en el interior y, al cabo de los años, deja de fluir.

En ese momento el pozo se tapa o se intentan otros procedimientos de recuperación del petróleo, el cual aún moja todo el interior rocoso del pozo. Por ejemplo, al inyectar vapor dentro de un pozo aparentemente agotado se logra volver a levantar la presión y, como el petróleo es menos denso que el agua que se condensa, éste vuelve a fluir por la boca del pozo. En 1992, casi 30% de la producción nacional de crudo se obtuvo mediante esta técnica. Actualmente se realiza mucha investigación en esta dirección de *recuperación secundaria* o *terciaria*, como se la ha llamado.

Frecuentemente, la parte superior del entrapamiento está ocupada por los hidrocarburos gaseosos más ligeros, el denominado *gas natural*. La composición del gas natural es variable, pero el componente más abundante siempre es el metano (entre 70 y 90%), seguido del etano (entre 5 y 20%) y del propano (entre 5 y 1%) —véanse sus estructuras moleculares en la fórmula 6.

El aceite líquido por debajo del gas natural está formado por hidrocarburos que tienen entre 5 y 20 o más átomos de carbono. En él están disueltos otros hidrocarburos sólidos con mayor número de átomos de carbono, así como parte de los hidrocarburos gaseosos, que se disuelven debido a la alta presión del pozo. El aceite crudo tiene un color que varía entre café oscuro o verde hasta casi incoloro.

CUADRO 6. Los primeros productores mundiales de crudo en 1986.

<i>País</i>	<i>Porcentaje del total mundial</i>
URSS	21.3
Arabia Saudita	17.1
Estados Unidos	16.7
México	4.2

REFINACIÓN

Tal cual es, el petróleo crudo tiene poco uso. Tiene que ser refinado para obtener de él productos útiles. Como toda mezcla, sus propiedades varían de pozo en pozo. Es máspreciado el petróleo que contiene una mayor proporción de hidrocarburos con pocos átomos de carbono, o *crudo ligero*, ya que permite obtener mayor cantidad de gasolina y de productos petroquímicos.

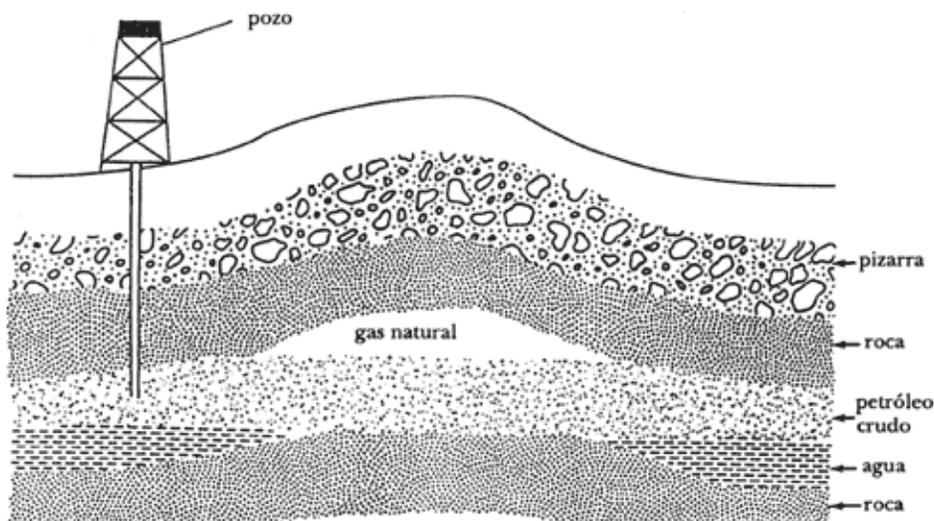
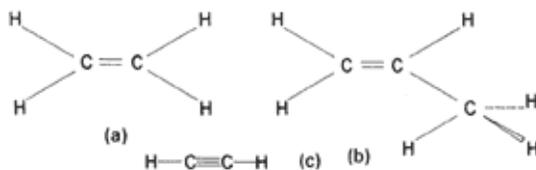


Figura 8. Esquema de un pozo de petróleo.

Su precio siempre es mayor que el del *crudo pesado*, el cual es un poco más difícil de procesar. En México contamos con ambos tipos de crudo, y aquí reciben el nombre de *crudo istmo*, el ligero, y *crudo maya*, el pesado. Desde 1988 se han encontrado yacimientos de crudo super ligero, al que se ha denominado *crudo olmeca*. En 1992, las exportaciones de crudo alcanzaron los 7400 millones de dólares, 25% correspondió al tipo istmo, 60% al maya y 15% al olmeca. Los principales países de destino fueron Estados Unidos (58.3%), España (17.5%), Japón (6.6%) y Canadá (2.3%).

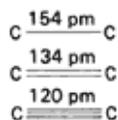
ENLACES DOBLES Y TRIPLES. LA SERPIENTE DE KEKULÉ

Cuando en una fórmula el químico coloca una raya entre dos átomos enlazados, está diciendo que una pareja de electrones los mantiene unidos. En los hidrocarburos de la fórmula 6 se presenta este tipo de unión, llamada *enlace sencillo*. A los hidrocarburos de cadena abierta como éstos se los llama *alcanos*. Sin embargo, ocurre también que cuatro o seis electrones sirvan de lazo de unión entre dos átomos de carbono, en cuyo caso hablamos de *enlaces dobles* o *enlaces triples*. A los hidrocarburos con estos enlaces *reforzados* se los llama *alquenos* y *alquinos*, respectivamente. La fórmula 7 muestra algunos ejemplos.



Fórmula 7. Los alquenos más simples son la base de productos poliméricos ampliamente utilizados: a) etileno, b) propileno, c) acetileno, el alquino con dos átomos de carbono. A este último se lo empleó para el alumbrado público antes de la aplicación de la electricidad.

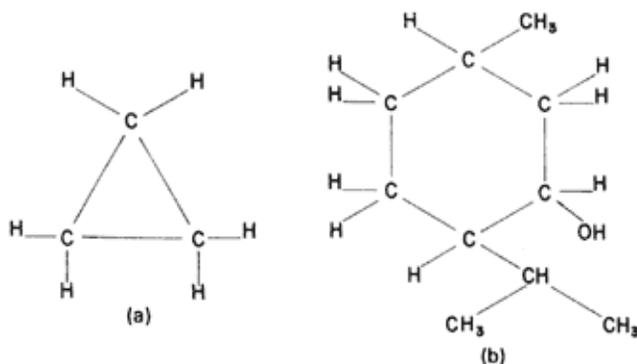
Como seis electrones enlazan mejor que cuatro y éstos mejor que dos, la distancia entre átomos de carbono es menor en un triple enlace que en uno doble y que en uno sencillo (véase la fórmula 8).



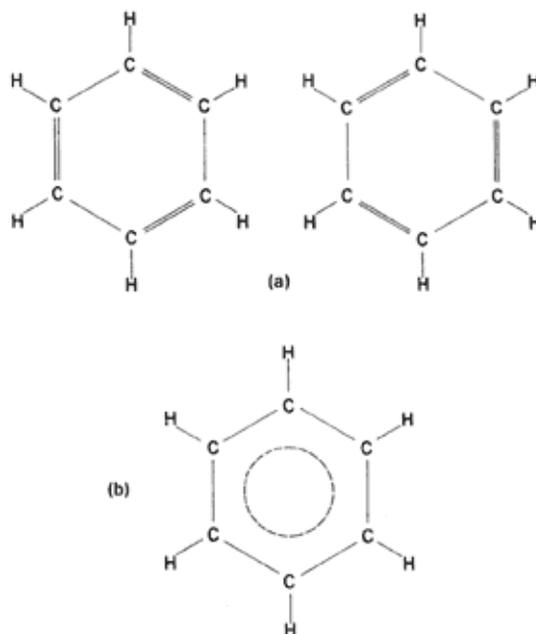
Fórmula 8. Distancia carbono-carbono en los enlaces sencillo, doble y triple. Un picómetro (pm) es la billonésima parte de un metro.

Los hidrocarburos forman ciclos, de una manera parecida a como un perro se muerde la cola. Es cosa de que el último carbono de una cadena abierta se enlace con el primero. Un par de compuestos cíclicos de utilidad se muestran en la fórmula 9.

Un hidrocarburo muy especial es el benceno, que tiene la fórmula C_6H_6 . Se dice que Friedrich August Kekulé, un notable químico alemán del siglo pasado, resolvió el problema de su estructura en 1866, cuando soñó a una serpiente que se comía su propia cola. En efecto, el benceno es un hidrocarburo cíclico, aunque su reducido número de hidrógenos habla de la presencia de enlaces múltiples.



Fórmula 9. Hidrocarburos cíclicos. a) Ciclopropano, un potente anestésico empleado en cirugía. b) Mentol. El principio activo de la menta cuenta con un anillo de seis carbonos (ciclohexano).



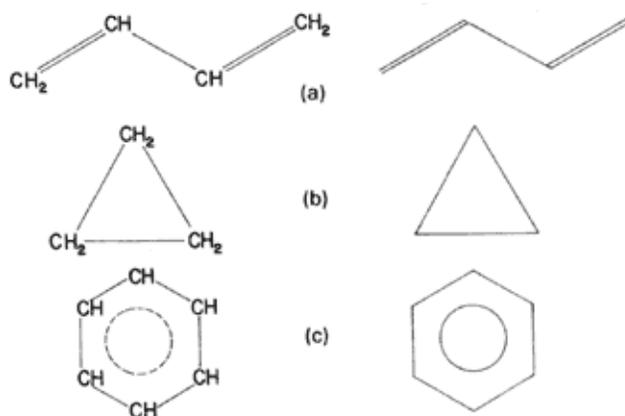
Fórmula 10. a) Estructuras del benceno según Kekulé. b) Concepción actual del benceno. Los electrones de los dobles enlaces propuestos por Kekulé no se hallan entre pares específicos de átomos de carbono. En realidad se encuentran deslocalizados alrededor de todos los átomos del ciclo, lo cual se representa por el círculo punteado.

TAQUIGRAFÍA QUÍMICA

En química orgánica es común representar las fórmulas de los compuestos en forma de una gráfica que condensa la información. Las reglas son:

- eliminar la escritura de los símbolos de carbono e hidrógeno,
- cada trazo lineal representará una unión carbono-carbono, y
- evitar la escritura de los enlaces carbono-hidrógeno.

Se han colocado tres ejemplos de esta taquigrafía en la fórmula 11.



Fórmula 11. Fórmulas desarrolladas y gráficas de tres compuestos: a) Butadieno. B) Ciclopropano. C) Benceno.

Esta simplificación de las fórmulas, como se verá, es de mucha utilidad para ahorrar tinta y tiempo. Convierte además al químico en un experto trazador de figuras geométricas.

UTILIZACIÓN GLOBAL DEL PETRÓLEO

Del petróleo se aprovecha tanto el gas natural como el aceite crudo. En la figura 9 se presenta, a partir de datos de la ONUDI (Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial), el destino mundial anual (1980) de los 1 100 millones de toneladas producidas de gas natural y de los 3 000 millones de toneladas de aceite crudo.

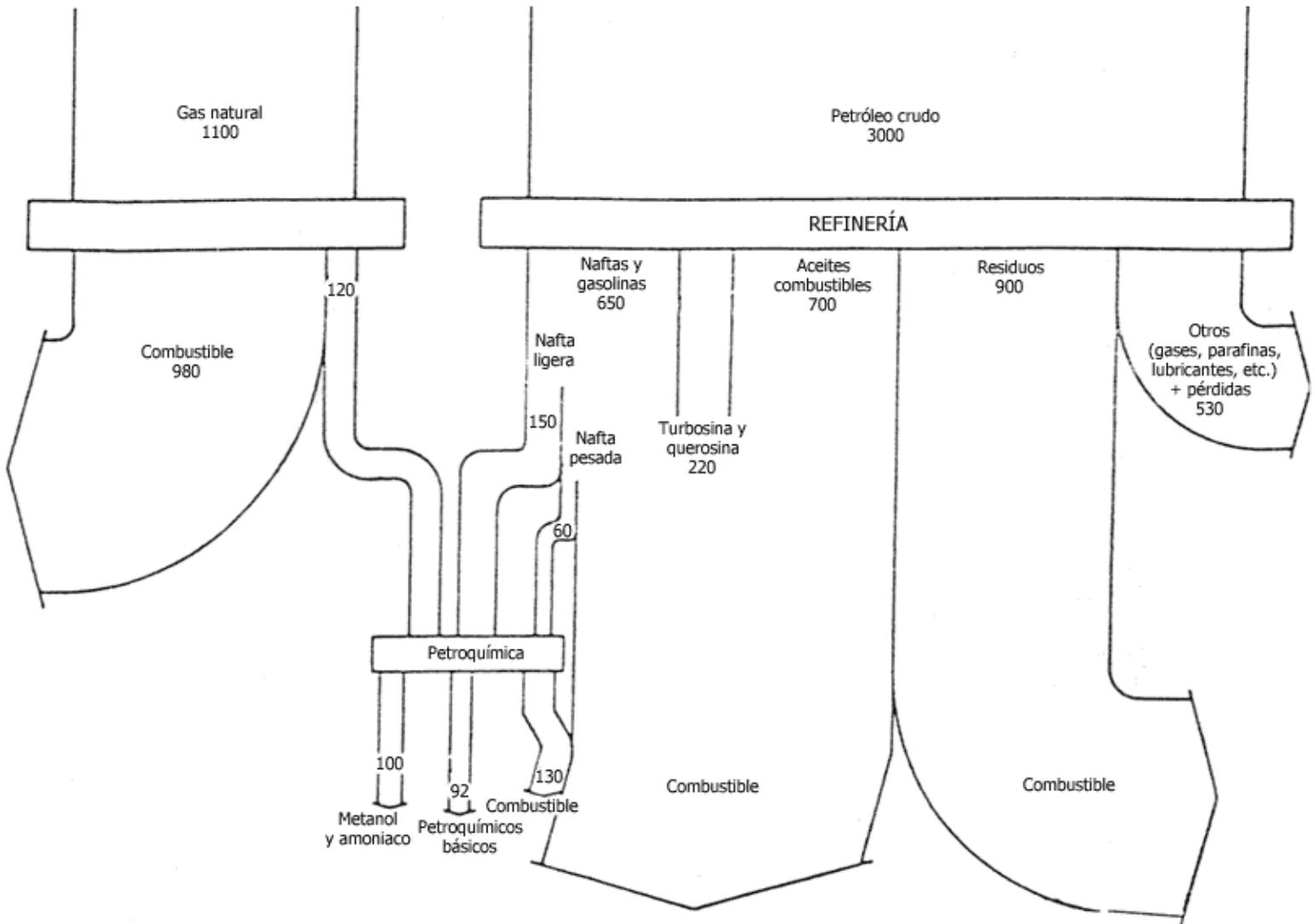


Figura 9. Destino de los hidrocarburos del petróleo en el ámbito mundial (en toneladas por año). (Fuente: ONUDI, *The Petrochemical Industry in Developing Countries*, 1985.)

Podemos observar que una proporción alta del destino final del petróleo es su combustión como energético. Únicamente alrededor de 7% se utiliza para la obtención de productos petroquímicos. Por lo visto, el mercado mundial no da para más.

Por lo pronto, vale la pena detenernos un poco en el cuadro de refinación. Más adelante nos ocuparemos tanto de la petroquímica que se deriva del gas natural (120 millones de toneladas al año, de acuerdo con la figura 9) como del aceite crudo (210 toneladas anuales). Pero antes de empezar veamos uno de los peligros existentes detrás de los hidrocarburos.

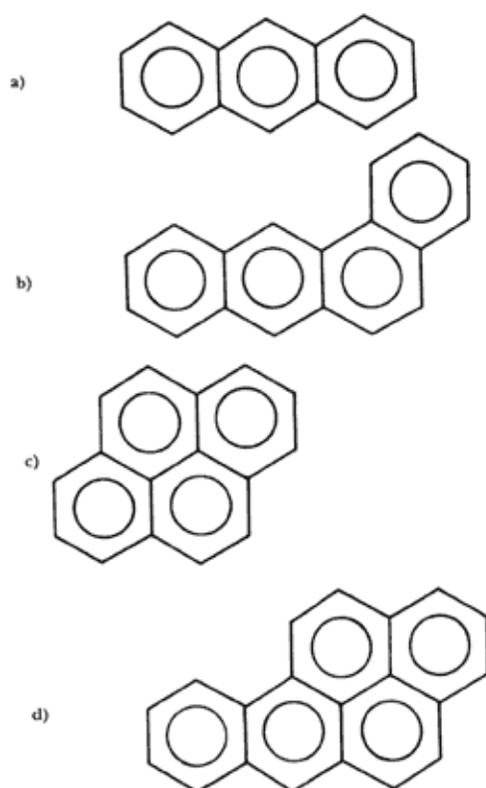
CÁNCER Y PRODUCTOS AROMÁTICOS

Con la industrialización de Europa en el siglo pasado se descubrió que los trabajadores del carbón y los deshollinadores de chimeneas desarrollaban cáncer en la piel. Hacia 1915, en el Japón, se demostró que bastaba *pintar* a un conejo con alquitrán (un derivado de la pirólisis del carbón de hulla) para que se le indujera cáncer.

Se estima que más de 50% del cáncer humano es producido por sustancias carcinogénicas que se hallan en el medio ambiente. Los ejemplos del párrafo anterior han ratificado que algunos hidrocarburos aromáticos policíclicos producen cáncer (véase la fórmula 12). Parece que el benceno también causa cáncer.

El benzopireno es uno de los carcinógenos más poderosos y se lo considera una de las principales causas del cáncer pulmonar. Se produce en la combustión de diversos productos orgánicos, como la gasolina, el diésel y, desde luego, los cigarrillos. Se lo ha encontrado incluso en alimentos preparados por combustión directa, como los famosos tacos al carbón.

No son del todo bien conocidas las razones por las que algunos hidrocarburos producen cáncer y otros no. Se manejan hipótesis relativas a la distribución de los electrones y otras relacionadas con el tamaño de las moléculas (para que se intercalen apropiadamente en el ADN).



Fórmula 12. Reciben el nombre de *aromáticos* todos los compuestos derivados del benceno (véase la fórmula 10). Los aquí mostrados reúnen varios ciclos bencénicos en la misma molécula. Algunos de estos compuestos inducen cáncer por el contacto prolongado con ellos. a) Antraceno (no es carcinógeno). b) Benzo [α] antraceno (es carcinógeno). c) Pireno (no es carcinógeno) . d) Benzo [a] pireno (es un carcinógeno muy potente).

DESTILACIÓN PRIMARIA

Como ya mencionamos, el petróleo crudo es una mezcla de miles de hidrocarburos y otros compuestos. La forma elemental de aumentar su valor es separar de él distintas fracciones de compuestos semejantes.

Para empezar, se eliminan los sólidos térreos suspendidos en el crudo y de inmediato se envía éste a la refinería. Allí el primer paso es la destilación del crudo. En este proceso se aprovecha que cada compuesto tiene una temperatura

característica de ebullición. En el laboratorio bastan un mechero, un matraz y un refrigerante para separar una mezcla por destilación. Sin embargo, en la industria se requieren enormes equipos que se denominan torres de destilación. El diagrama de una torre de destilación primaria se muestra en la figura 10.

Antes de su ingreso a la torre, el petróleo crudo es precalentado en hornos que queman gas natural. Por motivos de ahorro energético, las mismísimas corrientes que salen de la torre, desde la menos hasta la más caliente, también se utilizan en el precalentamiento del aceite crudo, antes de entrar al horno. Ello implica un ahorro de gas natural. Así, en ocasiones el crudo se aprovecha para condensar el gas que sale por la parte superior de la torre (véase la figura 10) y para enfriar el resto de las corrientes de salida. En este trayecto el crudo se precalienta y está listo para entrar al horno, y finalmente a la torre.

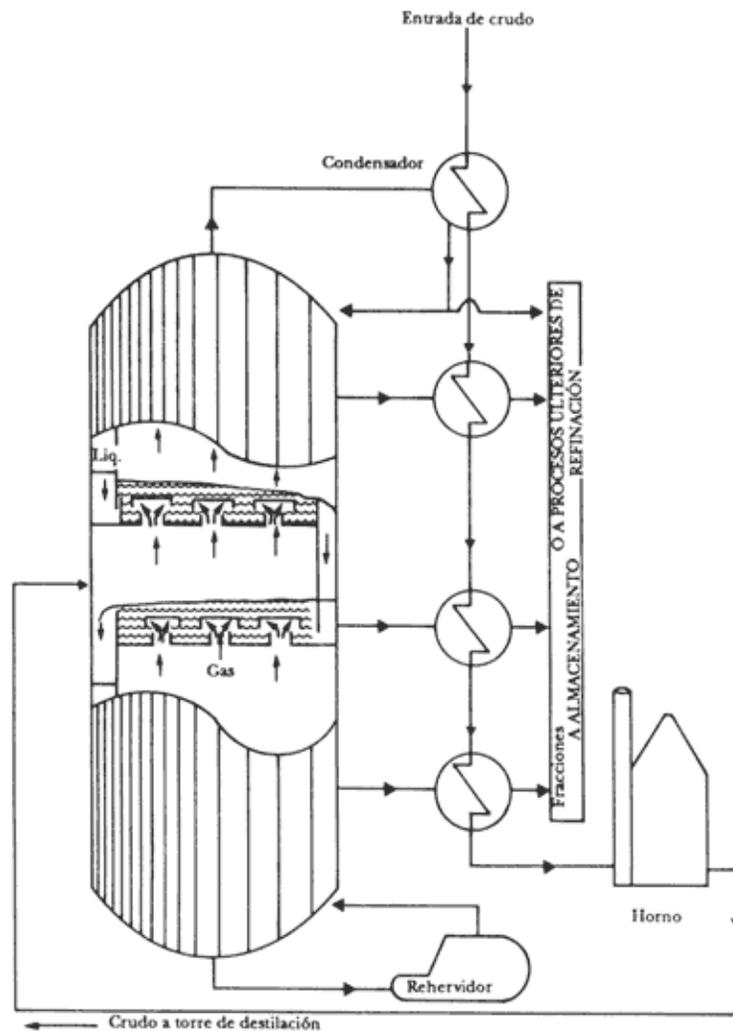


Figura 10. Torre de destilación primaria y tren de calentamiento de crudo. En el interior de la torre existen dos corrientes que fluyen en direcciones opuestas. Hacia arriba marcha la fase gaseosa, impulsada por el rehervidor de la parte inferior. Hacia abajo cae por gravedad la fase líquida, alimentada por el condensador de la parte superior. En cada *plato* de la torre el gas y el líquido entran en contacto íntimo. El resultado es que los compuestos más volátiles y ligeros pasan a la fase gasosa, con lo que continúan su ascenso hacia el plato superior, mientras que los menos volátiles se condensan como líquidos y acompañan esta fase hacia el plato inferior.

Para el ingeniero químico, el diseño de una torre de éstas es un problema clásico de su profesión. ¿Qué diámetro proponer para la torre? ¿Cuántos platos de contacto líquido-vapor hacen falta? ¿En qué plato alimentar el crudo? ¿A qué temperatura debe introducirse? ¿Cuánto vapor alimentar al rehervidor?

El arranque de la planta de destilación es otro bello problema: ¿cómo lograr que las corrientes destiladas, que antes constituían el crudo, sean las que lo precalienten? Pruebe el lector su ingenio para sugerir un procedimiento de arranque.

FRACCIONES DEL PETRÓLEO

La temperatura cambia a lo largo de la torre. En la parte superior se tiene la más baja, donde se encuentran en equilibrio los componentes más ligeros (y de menor punto de ebullición). Por el contrario, en la parte inferior la temperatura es mucho más alta y lo es también la proporción de los componentes pesados y menos volátiles.

Como se colocan diversas salidas laterales en la torre, el petróleo crudo logra separarse en varias fracciones, cada una con un diferente intervalo de temperaturas de ebullición e hidrocarburos de diferente número de carbonos en su cadena (véase el cuadro 7).

CUADRO 7. Fracciones del petróleo que abandonan la torre de destilación.

<i>Nombre</i>	<i>Intervalo de temperatura de ebullición (°C)</i>	<i>Número de carbonos</i>	<i>Uso</i>
Gas incondensable	menor de 20	1 a 4	combustible
Éter de petróleo	20 - 80	5 a 7	disolvente
Gasolina	35 - 220	5 a 12	combustible de autos
Querosina	200 - 315	12 a 16	combustible de aviones
Aceite ligero	250 - 375	15 a 18	combustible diésel
Aceite lubricante y grasas	mayor de 350	16 a 20	lubricante
Cera	sólido que funde entre 50 y 60	20 a 30	velas
Asfalto	sólido viscoso	-----	pavimento
Residuo	sólido	-----	combustible

En la figura 11 se muestra un cuadro sinóptico con los destinos principales de las fracciones del petróleo. Cada una de las corrientes que abandonan la torre primaria de destilación recibe tratamientos posteriores en la propia refinería o en plantas externas.

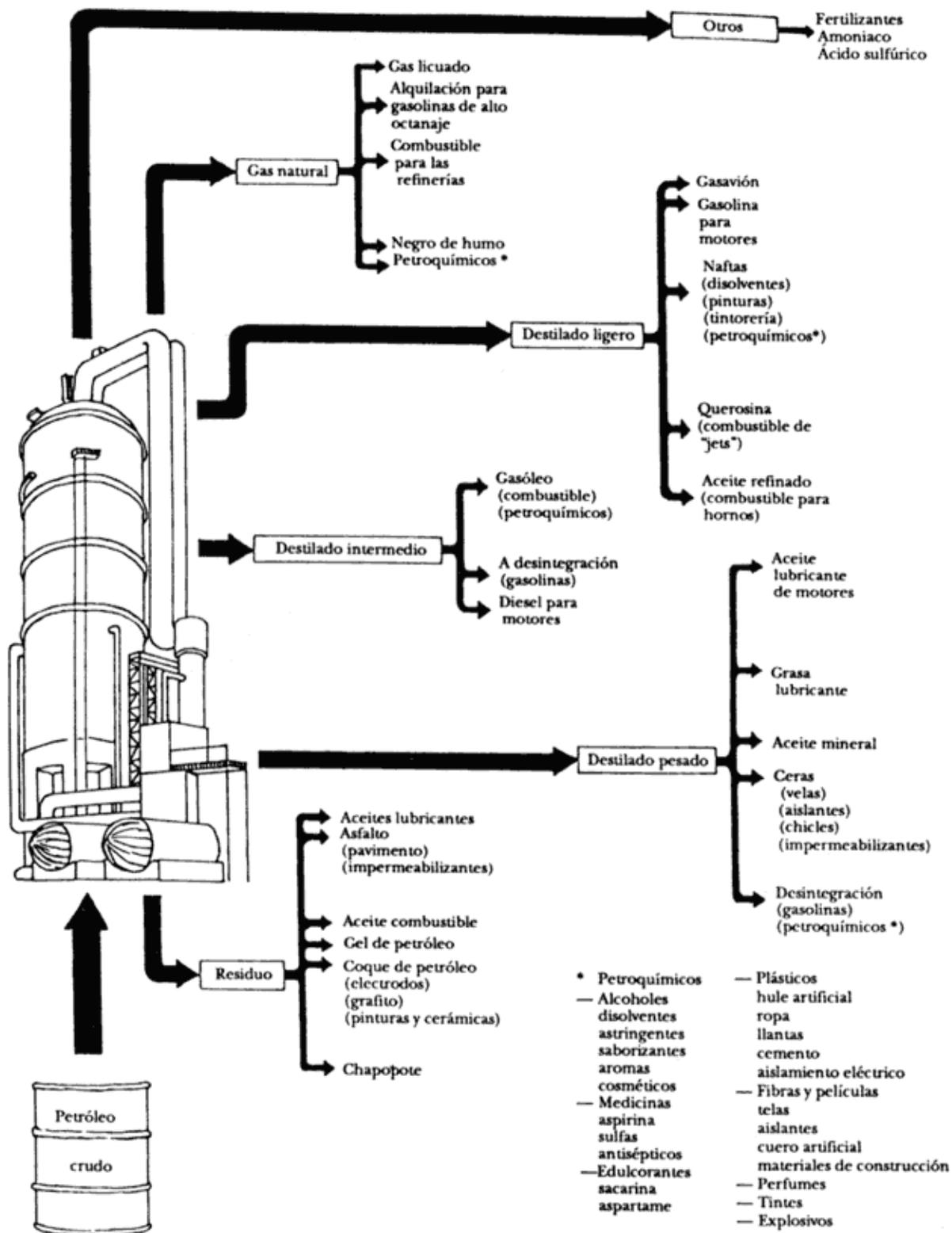


Figura 11. Destino de las diferentes fracciones del petróleo, después de la destilación primaria.

Cada uno de estos procesos posteriores a la destilación proporciona mayor valor agregado a los productos del petróleo y los transforma en bienes mucho más aprovechables directamente por la población. La industria del petróleo consiste en un frondoso árbol cuyo tronco es el petróleo (crudo más gas natural), sus ramas principales son los efluentes de la destilación primaria, y cada una de éstas se deriva hacia diversos procesos ulteriores.

Así, el largo camino que parte del petróleo en el pozo y que llega hasta la camisa que usamos, consta de toda una secuencia de pasos, conocida como *cadena productiva*. Se entiende por cadena productiva una estructura eslabonada de productos petroquímicos que, con base en los productos básicos de la refinería, establece una secuencia *genealógica* que pasa por los petroquímicos intermedios y llega a los de uso final, que sirven como materia prima de multitud de bienes de consumo.

En este libro tendremos oportunidad de conocer algunas de estas cadenas productivas.

ISÓMEROS: ¿CON QUÉ SE COMEN?

En química se emplea el término *isómero* para designar a dos compuestos con la misma fórmula (lo cual implica la misma composición porcentual de cada elemento), pero cuyas moléculas muestran un ordenamiento espacial diferente de sus átomos. Por ejemplo, el éter metílico y el alcohol comercial son sustancias isoméricas. Sus fórmulas condensadas son C_2H_6O , pero sus fórmulas moleculares revelan diferencias (véase la fórmula 13).

Esa diferente posición del átomo de oxígeno es crucial. En ambos casos tenemos líquidos volátiles transparentes, pero uno es un potente anestésico (éter) y el otro un tóxico peligroso (es el bien conocido alcohol que encontramos en el vino, la cerveza, el pulque, el tequila, etcétera).



Fórmula 13. Dos moléculas isoméricas. Obsérvese que contienen el mismo número de átomos de cada elemento, esto es, seis hidrógenos, dos carbonos y un oxígeno: a) éter metílico; b) alcohol etílico.

En los hidrocarburos aparece frecuentemente el fenómeno de la isomería. Ello es clave, por ejemplo, en el octanaje de una gasolina.

LA GASOLINA Y EL OCTANAJE

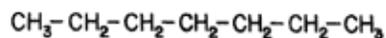
Las gasolinas mexicanas (Nova y Extra) se vendían con dos grados de octanaje hasta 1990. Hoy las gasolinas comerciales son la Nova y la Magna Sin, esta última para los automóviles fabricados desde 1991 que cuentan con un convertidor catalítico para reducir la contaminación, del que hablaremos más adelante. Por lo pronto respondamos a la pregunta, ¿qué es el octanaje?

Un motor está diseñado para que la gasolina gasificada sea admitida al pistón y, luego de ser comprimida, explote por la acción de la chispa de la bujía. No son adecuadas aquellas gasolinas que explotan por el solo hecho de comprimirlas, pues se queman prematuramente (el fenómeno se llama *preignición*). Esto produce que el pistón se extienda antes de que el cigueñal haya completado su ciclo. El resultado es un golpeteo constante, que se conoce como *cascabeleo*, que tarde o temprano acaba con los motores.

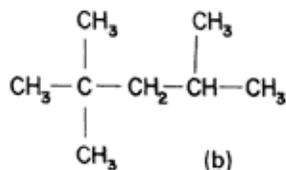
La mayor o menor tendencia a no producir cascabeleo se mide por el octanaje (o grado de octano) de cada gasolina. Las gasolinas con mayor octanaje son las que producen menor cascabeleo, mientras que las de menor octanaje son más susceptibles de preignición.

De forma arbitraria se ha asignado el octanaje de 0 y 100, respectivamente a dos hidrocarburos puros: el n-heptano, que trabaja pésimamente en los motores, y el 2,2,4-trimetilpentano (un isómero del octano C_8H_{18}), que se desempeña muy bien (véase la fórmula 14).

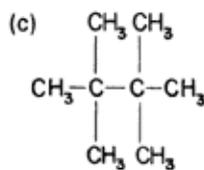
Por ejemplo, cuando decimos que una gasolina tiene un octanaje de 80, queremos indicar que, ante la combustión en el motor, se comporta igual que una mezcla de 80% de 2,2,4-trimetilpentano y 20% de n-heptano.



(a)



(b)



Fórmula 14. Conforme más ramificaciones hay en un hidrocarburo, el octanaje aumenta; a) n-heptano (0 octanos); b) 2,2,4-trimetilpentano (100 octanos); c) 2,2,3,3-tetrametilbutano (103 octanos).

Cada hidrocarburo tiene un octanaje característico en esta escala. La mayoría se encuentra entre el 0 y el 100, pero pueden ocurrir los octanajes negativos (para los hidrocarburos que se comportan todavía peor que el n-heptano) o los mayores de cien (para los que son mejores que el 2,2,4-trimetilpentano). Los isómeros lineales (como el n-heptano) poseen el peor octanaje, mientras que aquellos con más ramificaciones son óptimos (véase el cuadro 8). Por ejemplo, otro isómero del octano, el 2,2,3,3-tetrametilbutano de la fórmula 14 (c) tiene un octanaje de 103. Asimismo, los hidrocarburos bencénicos, también llamados *aromáticos* (derivados del benceno, el hidrocarburo de la fórmula 10) son de alto octanaje.

CUADRO 8. Octanaje de algunos hidrocarburos puros.

<i>Hidrocarburo</i>	<i>Índice de octano</i>
n-pentano	62
n-heptano	0
n-octano	17
3-metilheptano	35
2,3-dimetilhexano	79
2,2,4-trimetilpentano	100
benceno	106

Esto no quiere decir que los hidrocarburos lineales no tengan utilidad. Son malos componentes de las gasolinas, pero resultan indispensables en otros procesos industriales (por ejemplo, para extraer aceites de semillas como la soya, el algodón, el maíz, el ricino, el cacahuete y el lino).

CATÁLISIS. LA FORMA QUÍMICA DE METER EL ACELERADOR

Cada cambio químico sucede a una velocidad característica, en función de una variedad de condiciones. Mientras que existen fenómenos químicos extraordinariamente rápidos, también los hay desesperantemente lentos. Una explosión es un ejemplo de un fenómeno químico veloz. Por contraste, los diamantes se convierten lentamente en grafito, en un proceso que dura millones de años.

Cuando se trata de un proceso químico para producir un bien determinado, el factor económico entra en juego y el químico debe idear formas de acelerar su ocurrencia. Para ello hace participar alguno de los siguientes parámetros:

- a) La concentración de los compuestos que reaccionan. Si ésta aumenta, existe mayor probabilidad de que sus moléculas se encuentren y reaccionen.
- b) La temperatura. Por lo general, el calentamiento aumenta la velocidad de reacción. Los refrigeradores utilizan este principio, ya que al mantener fría la comida se reduce su velocidad de descomposición.

- c) El tamaño de las partículas. Si algún reactivo es un sólido, conviene molerlo finamente.
- Catalizadores. Son sustancias que aceleran la reacción, pero que quedan intactas al final de la misma (véase la figura 12). Por otra parte, se llama *inhibidores* a las sustancias que retardan la velocidad de las reacciones químicas. En la industria alimentaria, los conservadores, sustancias preservativas y antioxidantes son inhibidores que retardan la descomposición de la comida.
- d)

Sin duda, la catálisis es clave en la industria del petróleo. Es más, cerca de 90% de todos los procesos químicos industriales incluyen la presencia de un catalizador.

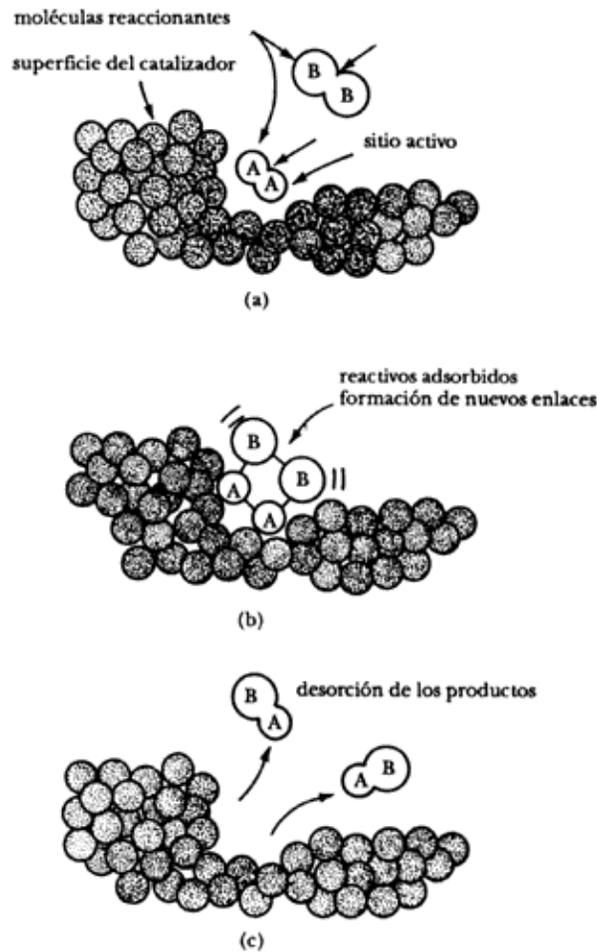


Figura 12. Ejemplo del efecto de un catalizador. a) La molécula A-A es absorbida en el llamado *sitio activo* del catalizador. b) La molécula B-B arriba también al sitio activo, en donde se rompen los enlaces A-A y B-B y se forman los nuevos enlaces A-B. c) Los productos abandonan el sitio activo.

Entre ellos, tal vez los más importantes sean, por su volumen:

- La producción de amoníaco, NH_3 , base de los fertilizantes nitrogenados;
- la síntesis de ácido sulfúrico, el producto químico más extendido (se producen anualmente unos 150 millones de toneladas en el mundo);
- la hidrogenación de aceites comestibles;
- la desintegración catalítica, y
- la reformación del petróleo.

Más adelante comentaremos algunos de estos procesos.

La catálisis no es privativa de la industria. Se presenta diariamente, en cada momento, en el interior de nuestros organismos. Las enzimas (proteínas globulares de las que nos ocuparemos al final del siguiente capítulo) controlan casi todas las reacciones químicas corporales, con lo que hacen posible la vida. De este tamaño es la importancia de la catálisis.

LA QUÍMICA Y EL OCTANAJE

Ya que la ciencia central nos ayuda a modificar a voluntad el arreglo atómico en los compuestos, su acción puede utilizarse para transformar hidrocarburos de bajo octanaje en otros con alto índice de octano.

La participación de la química en las refinerías ha resuelto dos problemas graves:

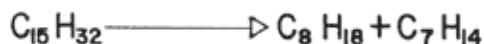
- que la gasolina natural que se obtiene por destilación sólo alcanza un octanaje cercano a 50 y no puede utilizarse tal cual, para los motores de combustión interna;
- que la gasolina natural sólo constituye de 20 a 30% del petróleo crudo y esa cantidad es insuficiente para satisfacer la demanda.

Por lo menos, son tres los tipos de reacciones químicas que ayudan a obtener artificialmente más y mejor gasolina:

Mediante este proceso se rompen los hidrocarburos de cadenas muy largas en

1) *Desintegración térmica y catalítica:*

dos o más que cuentan con cinco a nueve carbonos, los cuales sirven como gasolinas. La desintegración térmica logra este efecto gracias a la elevación de la temperatura. Sin embargo, la presencia de un catalizador (acelerador de reacciones) puede servir para lograr el mismo efecto a bajas temperaturas y presiones.



Fórmula 15. Una reacción de desintegración.

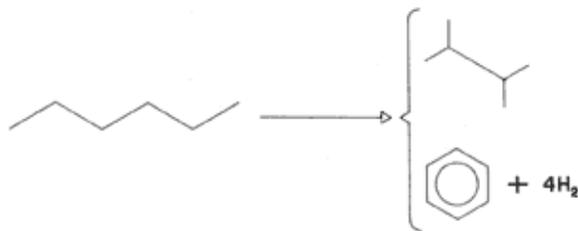
La reformación es otro proceso catalítico que transforma un isómero lineal en uno ramificado o en uno aromático, mediante el cual se logra aumentar el octanaje de la gasolina.

2) *Reformación:*

El proceso inverso a la desintegración es la

reunión de dos hidrocarburos ligeros para formar uno solo. Se conoce como alquilación. Esta síntesis puede lograrse cuando uno de los hidrocarburos posee un doble enlace carbono-carbono. Los catalizadores usados tienen especial atracción hacia este doble enlace, al cual debilitan a cambio de formar el lazo de unión entre las sustancias reaccionantes.

3) *Alquilación:*



Fórmula 16. Reformación del n-hexano. Los productos pueden ser hidrocarburos ramificados o benceno (ambos son de alto octanaje).



Fórmula 17. Una reacción de alquilación que produce el hidrocarburo con 100 octanos.

Mediante la alquilación se obtienen hidrocarburos con ramificaciones, o sea, de alto índice de octano.

Este proceso también es útil para que las gasolinas no se evaporen fácilmente. Por ejemplo, un hidrocarburo de cinco carbonos —un pentano— tiene un punto de ebullición muy bajo. Si mediante alquilación se puede transformar en uno de seis o siete átomos de carbono, su tendencia a volatilizarse es menor.

Este aspecto está cobrando una importancia enorme, pues se sabe que la presencia de ozono contaminante en la atmósfera de las grandes ciudades se debe a ciertas reacciones entre hidrocarburos, óxidos de nitrógeno y el oxígeno del aire, que se llevan a cabo en presencia de la luz del Sol. Así, para reducir la presencia de ozono en la atmósfera resulta importante disminuir la concentración de hidrocarburos, en vista de lo cual PEMEX realiza actualmente varios proyectos de plantas de alquilación para que las gasolinas no sean tan volátiles, y así los hidrocarburos ligeros no se evaporen fácilmente al ambiente.

ANTIDETONANTES Y CONTAMINACIÓN POR PLOMO

Aunque no se sabe con certeza la forma en que actúa, la adición de una pequeña cantidad de tetraetilo de plomo basta para elevar en forma sustancial el octanaje de una gasolina. Si a un litro de gasolina con 100 octanos se agregan dos mililitros de tetraetilo de plomo, el resultado es una gasolina con 120 octanos. El tetraetilo de plomo eleva más el índice de octano si es añadido a hidrocarburos ramificados. Además, tiene un curioso efecto detergente y lubricante sobre los pistones.

Sin embargo, el plomo liberado después de la combustión de la gasolina Nova es un contaminante peligroso. El contacto prolongado con el plomo produce la enfermedad llamada *saturnismo*, que antes era característica de los mineros.

Una persona normal puede excretar alrededor de 2 000 microgramos de plomo al día. No obstante, si la entrada de plomo es mayor; este metal se acumula en el organismo y causa diversos problemas en el sistema nervioso central.

En 1985, la Organización Mundial de la Salud (OMS) realizó un trabajo que cubrió doce grandes ciudades. Allí se informó que los habitantes de la ciudad de México contábamos con el nada gratificante récord de poseer la mayor concentración de plomo en la sangre: 22 microgramos por decilitro, en promedio.

El plomo aparece en nuestra comida, pues por cada kilogramo ingerimos también unos 100 a 300 microgramos de plomo, que provienen principalmente de los barnices de las vajillas que empleamos; en nuestra agua, ya que unos 100 microgramos por litro son de plomo, que provienen de las tuberías por las que atraviesa, que son de plomo o están soldadas con él; y en nuestro aire, por la combustión del tetraetilo de las gasolinas y por efluentes de otras industrias que utilizan este elemento.

Hace unos años se abusaba del plomo como ingrediente para fabricar pigmentos. Su empleo se limitó cuando se estimó que había sido la causa de muerte de alrededor de 200 niños en Estados Unidos. Las investigaciones de la OMS indican que si la sangre de un niño contiene al nacer más de 10 microgramos por decilitro, aquél pudiera presentar un retraso mental los dos primeros años de su vida.

A todo esto se exponía a los niños habitantes del Distrito Federal. Por ello resultó imprescindible reducir el contenido de plomo en las gasolinas y buscar antidetonantes que sustituyeran al tetraetilo de plomo. Desde septiembre de 1992, a la gasolina Nova que se expende en la zona metropolitana de la ciudad de México solamente se añaden 0.1 ml de tetraetilo por cada litro. En tal virtud, y debido asimismo a la aparición de la gasolina Magna Sin, las mediciones de plomo en la atmósfera de la ciudad de México en todo 1993 no rebasaron la norma internacional permisible.

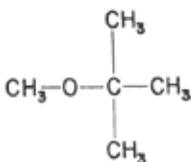
¿GASOLINA OXIGENADA? LA LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN

Por otra parte, para reducir la contaminación vehicular se desarrolló un convertidor catalítico por el que atraviesan los gases del escape. Mediante una reacción catalítica propiciada por metales pesados (platino, paladio y rodio) se logra reducir las emisiones de monóxido de carbono, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (el primero es un potente veneno para el organismo

y los segundos, como ya se mencionó, son los precursores de la formación de ozono en la baja atmósfera). Sin embargo, la presencia de plomo en la gasolina destruye la acción del catalizador, pues se dice que el plomo *lo envenena*. Debido a ello, para instalar dicho convertidor en todas las unidades automotoras nuevas fue necesario desarrollar un nuevo tipo de gasolina sin plomo, que es la Magna Sin. Esta gasolina contiene un nuevo antidetonante, que es el metil-terbutil éter, o MTBE (véase fórmula 18) que es un compuesto con un átomo de oxígeno. Por ello se dice que la Magna Sin es una *gasolina oxigenada*.

Esta acción es una aportación más de la química en la lucha contra la contaminación. En 1992 PEMEX añadió más de 3 000 millones de litros de MTBE a la gasolina de los automóviles en México.

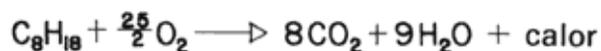
Por otra parte, además del cierre de la refinería de Azcapotzalco, en 1992 se redujo el contenido de azufre en el gasóleo industrial que se quema en la zona metropolitana, y en Octubre de 1993 apareció en el mercado el diésel Sin, que es un combustible diésel con menos de 0.5% de azufre. En este caso, logramos obtener el producto al mismo tiempo que en Estados Unidos, lo cual habla de la calidad de nuestro personal técnico y científico en la industria de la refinación del petróleo. Con todas estas acciones disminuyó notablemente la presencia de dióxido de azufre, SO_2 , en el aire de la ciudad, el cual en los últimos años ha permanecido por debajo de la norma internacional aceptada.



Fórmula 18. Éter metil-terbutílico, base de la gasolina oxigenada. Hasta ahora hemos tenido que importarlo, pero pronto PEMEX tendrá la capacidad de producir todo el necesario.

COMBUSTIBLES ESPECIALES

Para que una sustancia sea útil como combustible, debe desprender una gran cantidad de calor cuando reacciona con el oxígeno. La fórmula 19 presenta la combustión completa de un octano.



Fórmula 19. Reacción química que se lleva a cabo en los motores de combustión interna. Se necesitan 25 moléculas de oxígeno para quemar dos moléculas de octano. Si el motor no recibe el aire suficiente, la reacción puede no ser ésta, sino la que produce monóxido de carbono (CO), que es sumamente venenosos. Entre otras cosa, por eso conviene afinar puntualmente el motor de un vehículo.

Vale la pena desviarnos un ápice del tema de este capítulo para presentar otras sustancias que son aún mejores combustibles que los hidrocarburos. Por ejemplo, la hidrazina (N_2H_4), un hidruro del nitrógeno, es la sustancia preferida para el lanzamiento de cohetes y misiles. Este compuesto llevó al hombre a la Luna. Su combustión, además de calor; sólo produce agua y nitrógeno gaseoso (véase la fórmula 20); es un combustible no contaminante.

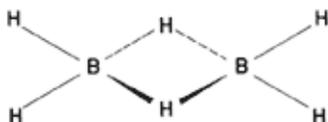


Fórmula 20. Reacción de combustión de la hidrazina.

En la década de los cincuenta se esperaba que los hidruros de otro elemento, el boro, fueran excelentes combustibles. Se iniciaron en Estados Unidos diversos programas de investigación, cuyo resultado fue *aparentemente* un fracaso. Los hidruros de boro, al quemarse, generaban óxidos sólidos inmanejables. Sin embargo, como un ejemplo más de que todo nuevo conocimiento es útil, el área que se inició fue de las más importantes y estratégicas de la química inorgánica.

Por ejemplo, hoy se producen 2 000 toneladas anuales de borohidruro de sodio (NaBH_4), un excelente agente reductor en transformaciones químicas. Su paternidad se debe al químico H.C. Brown, quien luego abrió brecha en el uso de los compuestos de boro para la síntesis de moléculas orgánicas, por lo que recibió el Nobel de química en 1979.

Un compuesto de boro, el hidruro llamado *diborano*, B_2H_6 , revolucionó muchos aspectos de la química. Se inflama en contacto con el aire, liberando más calor que cualquier hidrocarburo o la hidrazina, y su estructura muestra un átomo de hidrógeno enlazado a otros dos átomos (véase la fórmula 21), a pesar de que aparentemente no existen los electrones necesarios para ello. Estos compuestos deficientes en electrones son tema actual de investigación en el mundo. Un grupo de investigación del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN tiene contribuciones notables en este campo.

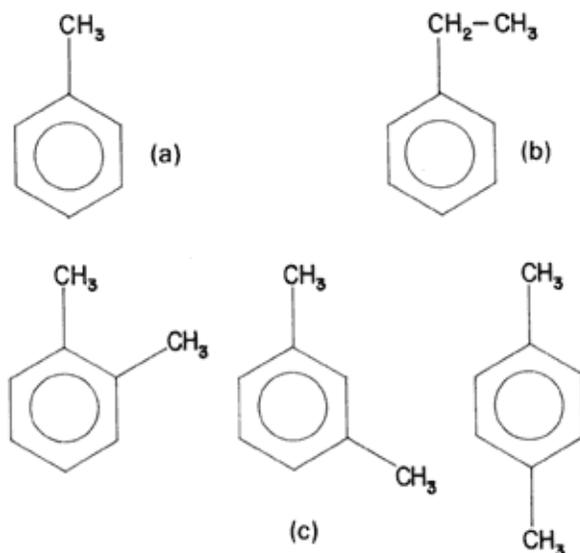


Fórmula 21. Diborano. Los hidrógenos puente entre los dos boros se encuentran por encima y por debajo del plano del papel. Ambos muestran una valencia de dos (están enlazados a dos átomos).

EL TREN DE AROMÁTICOS

La mayor parte de los compuestos aromáticos del petróleo o de los producidos en la refinación se utilizan para aumentar el octanaje de las gasolinas. Sin embargo, en algunas refinerías se establecen procesos para la producción amplia de estos compuestos. Por ejemplo, en México existe un tren de aromáticos en La Cangrejera, Veracruz —por ahora el complejo petroquímico más importante de América Latina— y en la refinería Lázaro Cárdenas de Minatitlán.

La Cangrejera consta de veinte plantas, siete de las cuales se dedican a la producción de aromáticos (véase la fórmula 22).



Fórmula 22. Los derivados más comunes del benceno. a) Metilbenceno o tolueno. b) Etilbenceno. c) Isómeros del dimetilbenceno o xilenos. El primero se llama orto-xileno, le siguen el meta-xileno y el para-xileno.

Para empezar, una planta reformadora BTX (por benceno-tolueno-xileno) transforma una carga que sólo contiene de 5 a 10% de aromáticos en un efluente con 42 a 47%, una notable muestra de transformación química catalítica. Otra de las plantas, la de *xilenos plus* emplea otro proceso catalítico para aumentar el contenido de xilenos y etilbenceno. Una tercera planta catalítica se encarga de la isomerización de xilenos, y así de elevar la proporción del isómero para-xileno, que se emplea posteriormente para la fabricación de fibras poliéster (ropa), adhesivos y pinturas, tintas, herbicidas y recubrimientos.

En segundo término vienen las plantas fraccionadora y extractora de aromáticos. El principio de éstas es la destilación. En el cuadro 9 se muestran las temperaturas de ebullición de los productos aromáticos primarios.

CUADRO 9. Temperaturas de ebullición de aromáticos.

<i>Compuesto</i>	<i>Temperatura de ebullición (°C)</i>
Benceno	80.1
Tolueno	110.6
Etilbenceno	136.2
Orto-xileno	144.4
Meta-xileno	139.1
Para-xileno	138.3

Los dos primeros compuestos son fácilmente destilables. Sin embargo, note el amable lector la poca diferencia entre las temperaturas de ebullición de los cuatro isómeros que les siguen en el cuadro. Para su separación se requieren torres de destilación muy altas. Es más, se prefiere separar al m-xileno del p-xileno (que ebullicen con menos de un grado de diferencia) por otro proceso diferente de la destilación, la llamada *cristalización fraccionada*. Si bien los puntos de ebullición de ambos compuestos son similares, sus puntos de congelación son de **-47.9°C** y **13.3°C**, así que mediante un proceso de cristalización *en frío* se logra separar el p-xileno de su isómero menos valioso, el m-xileno.

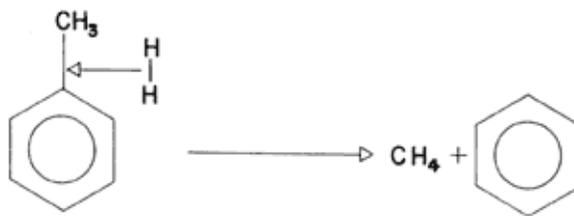
Por lo general, como las reacciones de aromatización se llevan a cabo a una temperatura moderada a la que no se presentan tantas rupturas de enlaces, la proporción de benceno que se obtiene muchas veces no es mayor de **10%**. Como la demanda del mercado es mayor, en La Cangrejera existe una última planta, llamada hidrodealquiladora de tolueno, en la que parte del tolueno se transforma en benceno (véase la fórmula 23). Los usos de éste son extensísimos, basta mencionar la fabricación de nailon, hule sintético, insecticidas, detergentes y perfumes.

No obstante, no todo el tolueno se transforma en benceno, pues aquél es importante materia prima para la producción de desinfectantes, preservativos de alimentos, colorantes y explosivos.

La figura 13 resume el tratamiento que el petróleo crudo recibe en la refinería. Vemos que además de los aromáticos se obtienen otros productos gaseosos (etileno, propileno y butileno), que por ser comunes a los que se producen a partir del gas natural, los trataremos más adelante.

N₂, UNA MOLÉCULA NO REACTIVA, Y SU REPERCUSIÓN EN LA AGRICULTURA

Los tejidos de todos los seres vivientes contienen nitrógeno. Este es un elemento básico de nuestra dieta y de la de todas las plantas y animales.



Fórmula 23. En la reacción de dealquilación la molécula de hidrógeno rompe el enlace entre el anillo y el grupo alquilo, CH_3 en este caso, con lo que se recuperan benceno y metano.

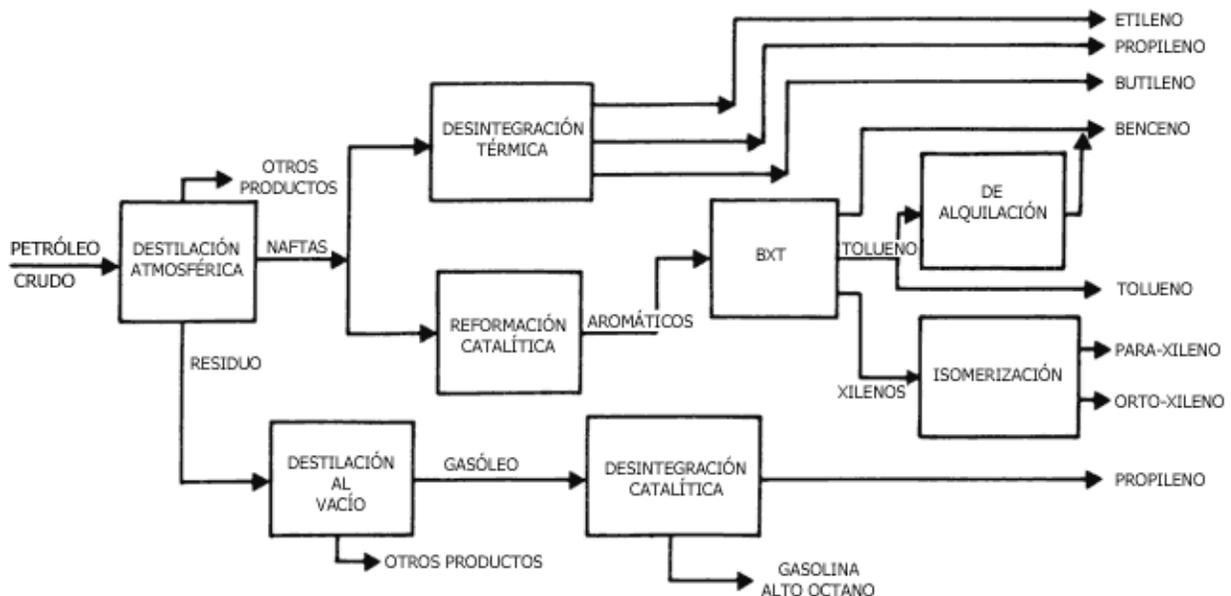


Figura 13. Síntesis de la cadena productiva mediante la cual una mezcla de miles de compuestos (el petróleo crudo) se transforma en productos más aprovechables. Las sustancias de la derecha son las materias primas de la industria petroquímica. (Tomada de *Análisis de la industria petroquímica por cadenas productivas*, Comisión Petroquímica Mexicana, México 1986.)

Vivimos rodeados de nitrógeno (78% del aire atmosférico contiene la molécula N_2). Grandes volúmenes de N_2 pasan todos los días por nuestros pulmones y, sin embargo, nada de ello nos sirve para suplir nuestras necesidades de este elemento. Nuestro cuerpo no posee la capacidad de transformar el N_2 e incorporarlo a nuestros tejidos. La molécula de N_2 es muy estable y sale de los pulmones de la misma forma en la que entra.

En realidad, obtenemos el nitrógeno que requerimos al asimilar el que contienen los vegetales y animales que constituyen nuestro alimento. Pero... ¿y cómo obtuvieron ellos ese nitrógeno?

Todos los animales dependemos del reino vegetal para hacernos del nitrógeno necesario. Los carnívoros lo hacen indirectamente, al alimentarse de otros animales vegetarianos. Ahora bien, las plantas obtienen el nitrógeno al absorber del suelo sales nitrogenadas (nitratos, NO_3^- , por ejemplo) o derivados del amoníaco, NH_3 , a través de las raíces. Pero... ¿por qué no se ha acabado el nitrógeno del suelo?

En parte se debe a que recircula en un proceso denominado *ciclo del nitrógeno*. Se estima que los organismos vivos contienen unos 15 000 millones de toneladas de nitrógeno. Cuando mueren, su nitrógeno retorna al suelo, de donde vuelve a ser tomado por las plantas (por eso la tierra de hoja es un buen abono). Pero la otra parte del asunto es que existe una fuente

de producción de nitrógeno asimilable: unos diminutos microorganismos son capaces de transformar el nitrógeno del aire (N_2) en amoníaco (NH_3) y otros derivados nitrogenados (se dice que *fijan* el nitrógeno). Estas bacterias y algas trabajan simbióticamente con otros vegetales (como las leguminosas, por ejemplo), que son el destino de ese nitrógeno asimilable (unos 200 millones de toneladas al año).

El campesino al rotar cultivos enriquece la tierra. Un plantío de frijol, que es una leguminosa, logra la nitrificación del suelo gracias a la acción de los microorganismos fijadores de nitrógeno.

Aunque parezca mentira, antes del siglo XX la alimentación de toda la humanidad descansaba en estos microorganismos. Si algo les hubiera pasado y hubieran desaparecido, la población del planeta habría decrecido enormemente, después de un periodo terrible de hambruna. La razón es que no se habría podido producir nitrógeno asimilable a partir del que existe en el aire. Sólo habríamos contado con el recirculado por los seres vivos, con el de la *sal nitro* chilena (enormes depósitos naturales de nitrato de sodio) y el obtenido como subproducto de la fabricación de carbón de coque.

¿COINCIDENCIAS HISTÓRICAS?

Durante muchos años, las salinas chilenas garantizaron el abasto de fertilizantes nitrogenados a todo el mundo. Adicionalmente, el nitrato chileno también es la materia prima para fabricar multitud de explosivos (trinitrotolueno —**TNT**—, nitroglicerina y nitrocelulosa). Por lo mismo, el control de las líneas marítimas hacia Chile era crítico para el abastecimiento oportuno de este elemento.

Al estallar la primera Guerra Mundial se libraron cerca de Chile dos batallas marítimas de importancia: una en las islas Coronel, que ganó Alemania, y otra en las Malvinas, de la que salieron victoriosos los británicos. Hay quienes opinan que estas dos batallas pudieron haber dado fin a la guerra, de no ser por dos enormes descubrimientos científicos de unos cuantos años antes.

Por una parte, en 1909 el químico alemán Fritz Haber perfeccionó el proceso para obtener amoníaco directamente a partir de nitrógeno e hidrógeno (véase la fórmula 24). ¡Por fin el género humano había podido vencer a la poco reactiva molécula del N_2 ! No resistió las altas temperaturas y presiones, ni la presencia de un catalizador.



Fórmula 24. Reacción de Haber.

Dos años antes, otro químico alemán llamado Wilhelm Ostwald encontró el catalizador adecuado para convertir amoníaco en ácido nítrico. El resto para llegar a obtener explosivos era *coser* y *cantar*.

Ambos descubrimientos fueron empleados por Alemania una vez que se les cerró la ruta hacia Chile. Así, aunque el proceso Haber tuvo en principio esta aplicación militar, que tal vez prolongó la primera Guerra Mundial, sirvió después para producir los fertilizantes que propiciaron la enorme explosión demográfica de este siglo.

Una vez más, el conocimiento científico sirvió como arma de dos filos, algo similar a lo que ocurre con el bisturí, que es una bendición en las manos de un médico, pero un peligro en las de un asesino.

PETRÓLEO Y FERTILIZANTES

De la fórmula 24 para obtener amoníaco, es claro que el nitrógeno se obtiene directamente del aire, pero ¿cómo puede conseguirse hidrógeno en forma elemental? Es más, la mezcla nitrógeno-hidrógeno que se requiere debe ser muy pura, para que no se *envenene* el catalizador que acelera la transformación.

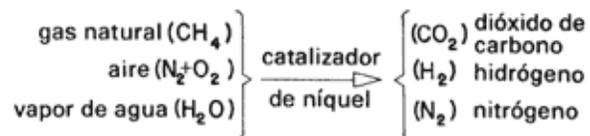
Hoy, la forma más barata de obtener el hidrógeno de la mezcla hace uso del metano, CH_4 , del gas natural.

Para obtener el metano se llevan a cabo diversos procesos:

a) Para empezar, se elimina el azufre del gas natural (que viene en forma de hidruro, H_2S). Luego este azufre se recupera en forma elemental para la fabricación de ácido sulfúrico.

b) El gas natural endulzado (sin H_2S) se alimenta a una planta criogénica. El objetivo de ésta es separar los diversos componentes del gas natural mediante su destilación sucesiva, con lo que se obtiene el metano puro.

Al metano se le adiciona vapor de agua y aire y se introduce la mezcla en enormes hornos a temperaturas de $1\ 000^\circ\text{C}$ (muy cerca del límite metalúrgico de las tuberías por las que atraviesa la mezcla), donde ocurre la transformación de la fórmula 25.



Fórmula 25. Producción de la mezcla nitrógeno-hidrógeno para obtener amoníaco a partir de gas natural.

El bióxido de carbono producido se elimina posteriormente mediante su absorción con disolventes especiales, con lo que se alcanza la deseada mezcla nitrógeno-hidrógeno.

En México, PEMEX cuenta con un enorme complejo productor de amoníaco en Cosoleacaque, Veracruz, uno de los más grandes del mundo.

Desde Cosoleacaque se envía el amoníaco por tubería hasta la planta de Fertimex, donde se transforma en diversos fertilizantes nitrogenados.

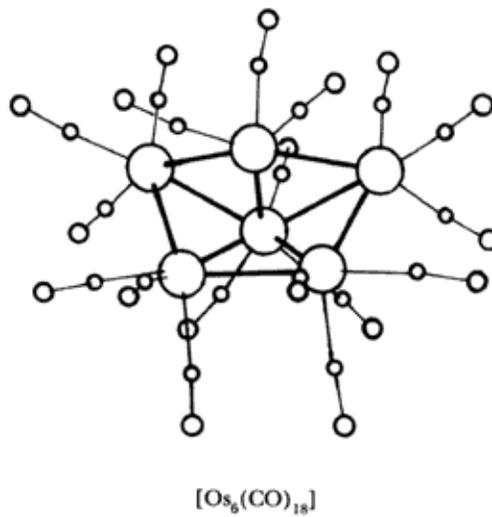
CÚMULOS METÁLICOS COMO CATALIZADORES

Los catalizadores más importantes en la industria petroquímica son los que contienen metales de transición (vanadio, hierro, níquel, cobalto, rodio, etcétera). Para que estos elementos actúen como catalizadores se requiere que tomen la forma de pequeñísimas partículas (con menos de una millonésima de centímetro de diámetro), llamadas *cristalitos*, las cuales se depositan sobre un soporte, como el óxido de aluminio.

Aún hoy es un rompecabezas entender los mecanismos de la catálisis, que es un área de intensa investigación actual. Una forma de ir despejando incógnitas ha sido estudiar, en el laboratorio, el comportamiento de compuestos que contienen más de dos átomos metálicos, enlazados entre sí formando una estructura polihédrica con caras triangulares; los llamados *cúmulos metálicos* (véase un ejemplo en la fórmula 26).

El estudio de las reacciones que se llevan a cabo sobre la superficie del cúmulo reflejan, en ocasiones, algunos procesos catalíticos comerciales, y dan luz sobre el fundamento de la catálisis.

Se han llegado a reunir más de 30 átomos metálicos en un cúmulo. Algunos alcanzan el tamaño para utilizarlos como cristalitos y han sido patentados como eficientes catalizadores.



Fórmula 26. Estructura de un cúmulo metálico con seis átomos de osmio (los círculos grandes) y 18 carbonilos (C=O).

LAS CADENAS PRODUCTIVAS QUE PARTEN DEL ETILENO

Multitud de productos petroquímicos se obtienen a partir de dos hidrocarburos con un doble enlace: el etileno, C_2H_4 , y el propileno, C_3H_6 . El primero es, con mucho, la materia prima petroquímica más importante. En la figura 14 se muestran algunas de las cadenas productivas en las que interviene el etileno.

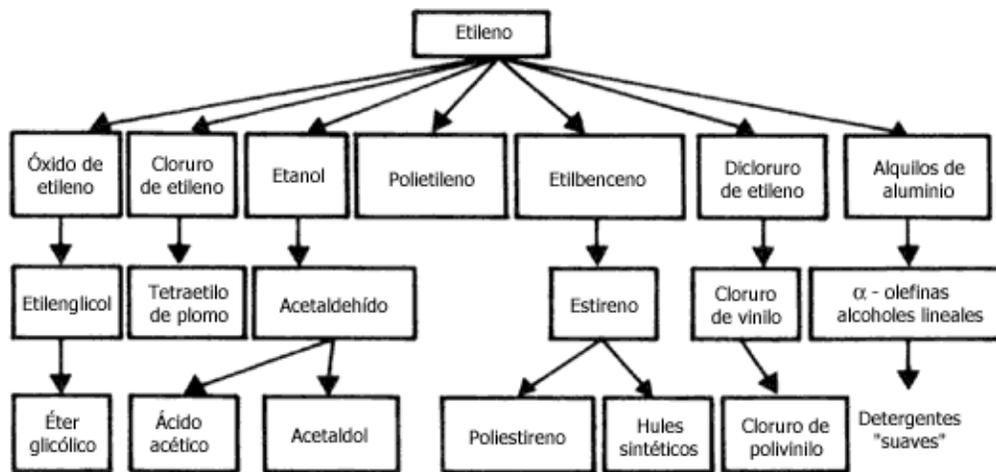
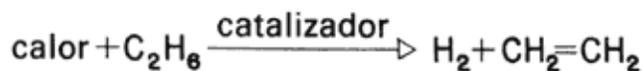


Figura 14. Los principales productos petroquímicos que se obtienen a partir del etileno. (Tomado de R.M. Stephenson, *Introducción a los procesos químicos industriales*, CECSA, México 1980).

Algunos de los nombres de sustancias que aparecen en este diagrama se volverán más familiares al lector cuando lea el capítulo tercero.

La obtención industrial de etileno se lleva a cabo mediante la deshidrogenación del etano (véase la fórmula 27).



Fórmula 27. Reacción de producción del etileno $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$, a partir del etano, C_2H_6 , del gas natural.

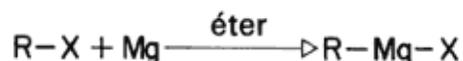
Esta transformación es fuertemente *endotérmica*, es decir; requiere de calor para ocurrir. Por eso debe llevarse a cabo en hornos de pirólisis, a unos 1000°C . Esta alta temperatura produce el rompimiento de enlaces, así que la formación de etileno se ve acompañada de la creación de otros productos secundarios no deseados, que son separados posteriormente por destilación o absorción.

En el complejo de La Cangrejera se cubre la producción de algunos de los compuestos del diagrama de la figura 14, a saber; óxido de etileno, acetaldehído, etilén glicol y polietileno de baja densidad. Son múltiples los usos de estas sustancias: en fibras, películas, cables, tubos y láminas plásticas, cementos, cosméticos, desodorantes, fluidos para frenos, herbicidas, tintas, detergentes, líquidos para champús, telas de planchado permanente, anticongelantes, inhibidores de corrosión y suavizantes de fibras. Todo un mar de productos petroquímicos de consumo final.

REACTIVOS DE GRIGNARD. LA MAGIA DE LA QUÍMICA ORGANOMETÁLICA

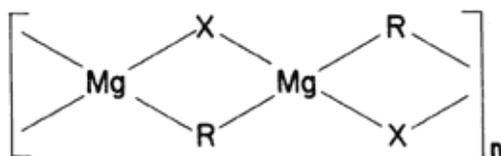
En el laboratorio, el interés del químico es la preparación de nuevos compuestos, para ampliar con ello el conocimiento universal sobre el comportamiento químico y dar lugar a posibles nuevas aplicaciones.

Damos fin a este capítulo sobre petroquímica con el trabajo que el francés Grignard realizó en 1900 sobre la reacción del magnesio metálico con los halogenuros de alquilo. Estos compuestos se obtienen al eliminar un hidrógeno de un hidrocarburo y sustituirlo por un halógeno (flúor; cloro, bromo o yodo).

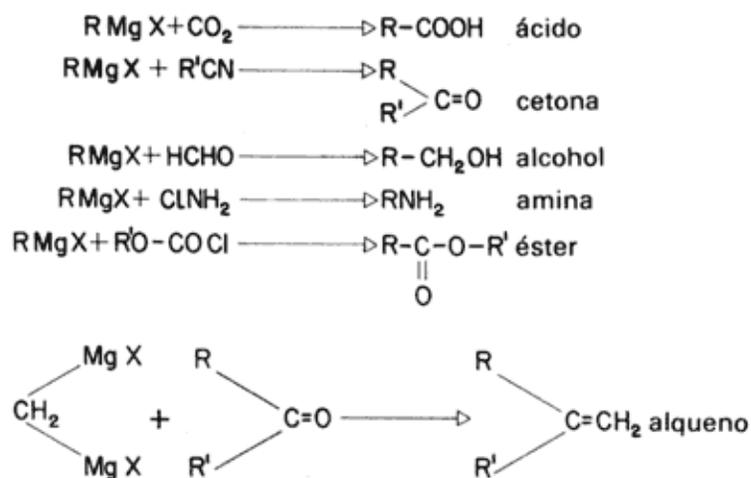


Fórmula 28. En esta reacción, X representa a un halógeno (flúor, cloro, bromo o yodo) y R a un radical alcalino (- CH_3 ' por ejemplo). La mezcla del halogenuro de alquilo, R-X, con magnesio metálico, en éter, da lugar al compuesto R-Mg-X, llamado *organomagnesiano*: el reactivo de Grignard.

La fórmula 28 presenta la reacción de formación del reactivo de Grignard. En ausencia de éter, los organomagnesianos son sólidos muy sensibles al aire y a la humedad, por lo que deben ser resguardados bajo atmósferas inertes (nitrógeno o argón). Su estructura es de largas cadenas (véase la fórmula 29).



Fórmula 29. Cadena de un organomagnesiano. Algo notable en estos compuestos es que el carbono presente en R presenta cinco enlaces, en cuyo caso la tetravalencia del carbono pierde todo sentido.



Fórmula 30. Esquemas simplificados de algunas reacciones donde el reactivo de Grignard se transforma en muy diferentes compuestos. A fin de cuentas, el halógeno del compuesto R-X de la fórmula 28 ha sido reemplazado por muy diversos grupos de átomos.

El trabajo de doctorado de Grignard, por el cual recibiera luego el Premio Nobel de química en 1912, consistió en el uso de los organomagnesianos en síntesis orgánica. Hoy estos reactivos son ampliamente empleados, pues permiten obtener una multitud de compuestos, con muy diversos grupos funcionales (véase la fórmula 30).

Reacciones como éstas son la *llave* del químico para abrir las puertas de lo desconocido. Parece mentira que existan procedimientos para sustituir un átomo (un halógeno en este ejemplo) por cualquier otro grupo, en todas y cada una de los trillones de moléculas de una muestra. ¡La química sí es verdadera producción en serie!

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Basualdo, J. S., *Complejo petroquímico La Cangrejera, Veracruz*, PEMEX, México, 1981.

Comisión Petroquímica Mexicana, *Análisis de la industria petroquímica por cadenas productivas*, SEMIP, México, 1986.

Chow, S., *Petroquímica y sociedad*, colección La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, 1987.

Fremantle, M., *Chemistry in Action*, MacMillan, Londres, 1987.

ONUDI, *The Petrochemical Industry in Developing Countries*, Viena, 1985.

PEMEX, *El petróleo*, Gerencia de información y relaciones públicas de Petróleos Mexicanos, México, 1985.

—, *Memoria de labores 1992*, México, 1993.

Romo de Vivar, A., *Química, Universo, Tierra y vida*, colección La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, 1988.

Silva Herzog, J., *La expropiación del petróleo 1936-1938. Álbum fotográfico*, Fondo de Cultura Económica, México, 1981.

Stephenson, R. M., *Introducción a los procesos químicos industriales*, CECSA, México, 1984.



III. MACROMOLÉCULAS

SIN DUDA, éste es otro campo en el que la ciencia central ha incidido profundamente en los últimos años.

El descubrimiento del hule y la síntesis de plásticos artificiales dieron un vuelco a la naturaleza de los materiales que rodean a la humanidad. En muchas de sus aplicaciones, los plásticos han sustituido con ventaja al vidrio, al cuero, al algodón, a la cerámica, a la madera y hasta a los metales. Hoy, los materiales plásticos son importantes satisfactores de necesidades en cualquier sociedad. En los países desarrollados, cada habitante cuenta en promedio con 100 kilogramos de plástico. En México esta cifra ya supera los 15 kilogramos, y su influencia abarca sectores industriales de gran importancia, como el automotriz, el electrónico, el de la construcción e incluso el de la salud.

Por otra parte, respecto a las macromoléculas de la vida, el hallazgo de la estructura de las proteínas y los ácidos nucleicos dio un sustento básico a la biología molecular.

Sobre estos asuntos versa el presente capítulo, en el que transitamos directamente la tercera parte de la ruta que nos lleva del tequesquite al ADN.

EL HULE: MACROMOLÉCULA NATURAL

Por su naturaleza elástica, el hule es una de las más interesantes e importantes sustancias que conocemos. Una liga de hule se puede estirar hasta 10 veces su tamaño original y regresa a su forma inicial casi sin deformarse. El hule se puede moldear de muchas formas y, además, es impermeable al agua y al aire.

El hombre conoció el hule hace muchos siglos, como una secreción lechosa de diversas plantas y árboles. El látex (como se conoce a la suspensión coloidal de las partículas de hule en agua) se encontraba principalmente en el guayule y la *hevea brasiliensis*, en México, Perú y Brasil.

Los antiguos mexicanos lo utilizaron en la fabricación de bolas para practicar el juego de pelota. Por cierto, el tiro para obtener el triunfo era tan raro y tan difícil que el jugador que lo lograba tenía derecho a apoderarse de todas las mantas y joyas de los espectadores. Otros habitantes de América utilizaron el hule para proteger del agua sus prendas de vestir y para la fabricación de botas rudimentarias.

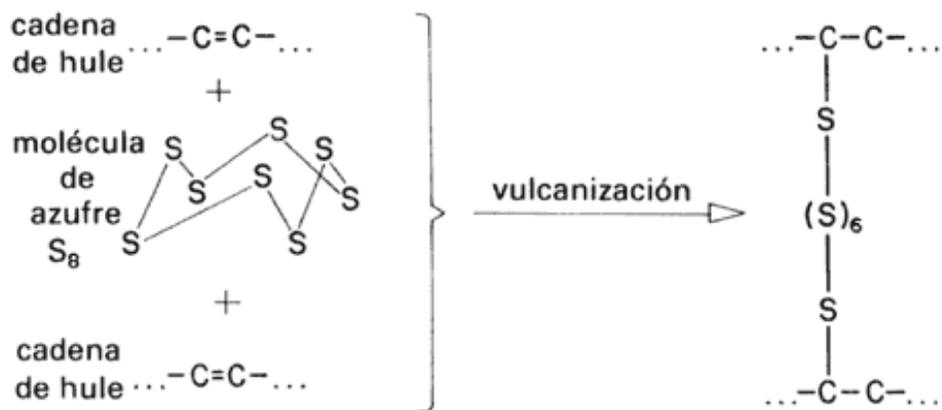
Cada árbol de hevea produce entre 15 y 30 gramos de látex por día. Otras sustancias lechosas con propiedades semejantes al hule se obtienen de la gutapercha en Malaya, Borneo y Sumatra, y del kok-sagis en la Rusia asiática.

Para obtener el látex se hacen incisiones en forma de V en el tronco del árbol. El jugo lechoso que fluye se recoge en vasijas. En la misma plantación, el látex se coagula (se rompe la estabilidad del coloide) mediante la adición de un ácido. Posteriormente, se lo lava y seca.

La primera fábrica que empleó hule natural crudo fue establecida en París en 1803. En un principio producía ligas y tirantes, pero posteriormente incorporó el hule en gabardinas, como repelente del agua. Sin embargo, este hule tenía serios inconvenientes. Además de ser pegajoso, en verano se reblandecía y en invierno se volvía rígido y quebradizo.

En 1839 Charles Goodyear descubrió accidentalmente cómo resolver estos problemas cuando se le derramó una mezcla de azufre y hule natural sobre una estufa caliente. El producto obtenido resultó ser más elástico y resistente al calor y a la tensión que el hule crudo. El proceso de mezclar y hacer reaccionar el azufre caliente con el hule crudo se llama *vulcanización*.

La explicación molecular de este profundo cambio en las propiedades del hule se muestra en la fórmula 31.



Fórmula 31. Las cadenas de polímero en el hule contienen puntos con dobles ligaduras carbono-carbono. El azufre, que consiste en moléculas con ocho átomos arreglados en forma de corona, reacciona con dos cadenas y las une entre sí. Este enlace que *amarra* unas cadenas con otras da al hule sus propiedades mecánicas y térmicas. Si el hule de las llantas de un vehículo no se vulcanizara, apenas rodaría unos pocos kilómetros.

Hacia fines del siglo pasado, el hule vulcanizado tenía tantos usos que la producción de la hevea en Brasil era insuficiente. Unos botánicos ingleses sacaron de contrabando semillas de árbol del territorio brasileño y produjeron una variedad más resistente a las enfermedades y con mayor rendimiento de látex.

El imperio británico estableció enormes plantaciones en sus colonias del Lejano Oriente. La cantidad y calidad de este hule les dio a sus poseedores el control prácticamente total del mercado mundial.

MACROMOLÉCULAS, POLÍMEROS Y MASA MOLECULAR

Desde el siglo pasado los químicos han establecido una escala especial de masas. Como lo que se trata de medir es la masa de un átomo o una molécula, se escogió una unidad sumamente pequeña: la *unidad de masa atómica (uma)*, que es la que corresponde aproximadamente al átomo de hidrógeno más abundante en la naturaleza:

1 *uma* = masa de un átomo de hidrógeno-1

En esta escala, las masas de los átomos naturales corresponden a números entre 1 (hidrógeno) y 238.1 (uranio). Aunque en este siglo se ha modificado la base de la escala, los efectos son poco notorios.

Las masas de las moléculas se obtienen al sumar las correspondientes de los átomos que las constituyen. Por ejemplo, la molécula de sulfuro de hidrógeno, H_2S , tiene masa de 34.1 uma, que es la suma de las de dos hidrógenos (con 1 uma cada uno) y un azufre (con 32.1 uma).

A las moléculas con masas superiores a 10 000 uma se las conoce como *macromoléculas*. Son esenciales en diversos procesos biológicos. La hemoglobina, el almidón, las enzimas y el ADN son macromoléculas naturales de los organismos vivos.

Cuando una macromolécula se obtiene al repetirse un patrón regular de átomos a lo largo de la misma, se tiene un *polímero*. Existen polímeros cuya masa molecular supera el millón de uma. El compuesto con moléculas más pequeñas, a partir de las cuales se construye un polímero, es un *monómero*. Para obtener algunos polímeros se utilizan dos o más monómeros, y por eso se conocen como *copolímeros*.

El algodón, la madera, el hule y la lana son ejemplos de polímeros naturales. Algunos polímeros sintéticos son el polietileno, y el policloruro de vinilo (PVC).

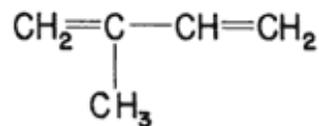
Cuando un polímero fluye y acepta ser moldeado, extrudido o laminado, se lo denomina *plástico*. Dentro de éstos

existen los *termoestables*, que no pueden ser suavizados o remodelados mediante calentamiento, y los *termoplásticos*, que si admiten su reprocesamiento. Las resinas epoxi, adhesivos familiares en el hogar; y las espumas de poliuretano de nuestras almohadas son termoestables. La facilidad para reprocesar los termoplásticos se debe a que sus cadenas poliméricas no están entrelazadas. El polietileno, de uso tan generalizado, y el poliacrilato de metilo, popular sustituto plástico del vidrio, son ejemplos de termoplásticos.

EL HULE SINTÉTICO. QUÍMICA EN ACCIÓN

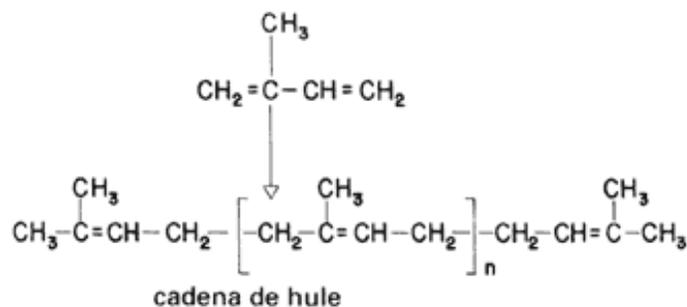
El incremento del precio de la materia prima, así como la irrupción de la primera Guerra Mundial, transformaron el panorama mundial del mercado del hule. Desde ese momento, particularmente en los países que carecían de este recurso, se dio un gran impulso a la producción de hule sintético.

Desde 1826, Michael Faraday había encontrado que el calentamiento del hule crudo o *destilación destructiva* producía un hidrocarburo de bajo punto de ebullición y fórmula C_5H_8 , que recibe el nombre de isopreno (véase la fórmula 32).



Fórmula 32. Molécula del isopreno. El hule se obtiene cuando una multitud de moléculas como ésta se enlazan unas tras otras. Por ello se dice que el isopreno es el monómero del hule.

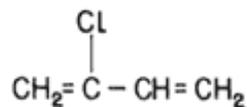
La clave molecular de la estructura del hule la halló Hermann Staudinger en Alemania, a mediados de la década de los años veinte. Ello le valió el Premio Nobel de química en 1953. Descubrió que el hule está constituido por moléculas gigantes, formadas a partir de una única unidad estructural: el isopreno. En el lenguaje actual se dice que el isopreno es el *monómero* del *polímero* llamado hule (véase la fórmula 33).



Fórmula 33. Un polímero es una macromolécula en la que se repite n veces la misma estructura básica (monómero). En el caso del hule, las cadenas pueden tener desde $n=20\ 000$ hasta $n=100\ 000$.

Los primeros intentos de polimerizar isopreno para obtener hule sintético fueron infructuosos. Por sí misma, la síntesis industrial del monómero presentaba serios problemas. Por eso es que muchas de las experiencias iniciales se realizaron con moléculas semejantes al isopreno. En 1928 se preparó en Alemania el primer sustituto del hule natural: un copolímero del butadieno y el estireno al que se llama SBR (por sus siglas en inglés) y que resultó

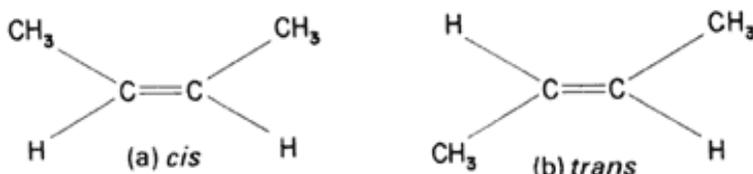
diferencia del hule, no se hincha ante el contacto con disolventes orgánicos, por lo que se emplea para fabricar las mangueras para verter gasolina.



Fórmula 35. El cloropreno es el monómero del neopreno.

ISOMERÍA GEOMÉTRICA

En una molécula que presenta una doble ligadura carbono-carbono, este enlace es rígido y no se presenta una rotación libre sobre el mismo. Debido a ello pueden existir dos isómeros del compuesto, dependiendo del arreglo espacial de los sustituyentes alrededor de la doble ligadura. Ésta es la *isomería geométrica*. Un ejemplo de ella, en la fórmula 36, puede ayudar a comprender el fenómeno.



Fórmula 36. Como el enlace C=C es rígido, existen dos formas geométricas de arreglar en el espacio dos grupos metilo, -CH₃, enlazados a cada carbono del doble enlace. a) El isómero *cis* tiene a los metilos hacia el mismo lado del doble enlace. b) El isómero *trans* los tiene en direcciones opuestas.

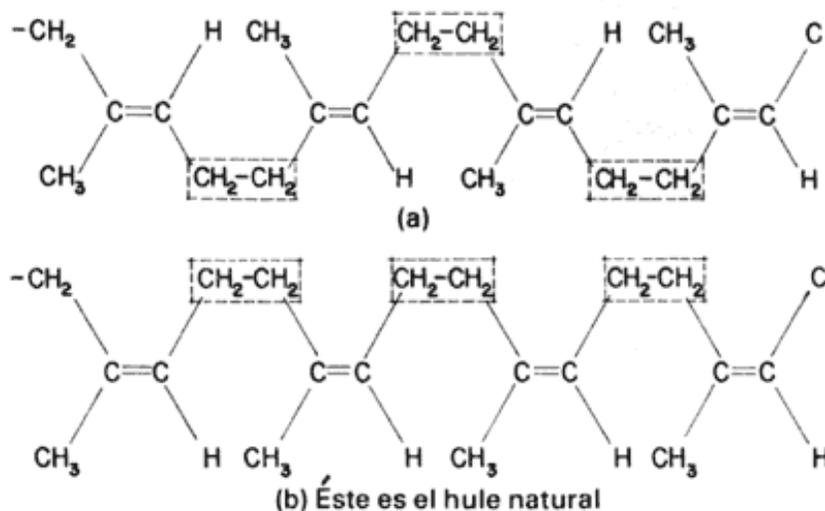
Este arreglo especial les da a las moléculas propiedades particulares y diferentes. Además de que los dos isómeros *cis* y *trans* tienen diferentes puntos de ebullición y fusión, reaccionan químicamente en diferente forma. En un momento veremos qué tiene esto que ver con el hule natural.

QUÍMICA: UNA CIENCIA SOBRE LAS TRES DIMENSIONES

Los intentos de polimerizar isopreno en el laboratorio para producir hule natural se coronaron con éxito en 1954. A pesar de que ya se conocía desde hacía más de 100 años la composición del hule, hasta ese momento se logró arreglar *esteroespecíficamente* a las moléculas del isopreno. Es decir; resolver el problema de la isomería *cis-trans* en la macromolécula.

Así, en el poliisopreno tenemos dos casos extremos, representados en la fórmula 37.

Antes de 1954 los intentos por polimerizar al isopreno producían una mezcla heterogénea de los isómeros *cis* y *trans* con propiedades distintas de las del hule natural (que es el *cis*). Es en esta fecha cuando, casi simultáneamente, los químicos de las compañías Goodyear y Firestone descubrieron cómo polimerizar esteroespecíficamente el isopreno. Con ello se pudo obtener en el laboratorio hule sintético idéntico al natural.



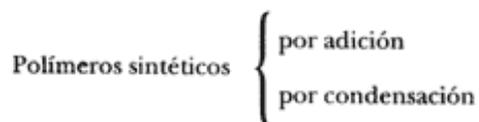
Fórmula 37. a) Poli-*trans*-isopreno. Los grupos $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ están alternados sobre lados opuestos de la doble ligadura. b) Poli-*cis*-isopreno. En este caso, todos los $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ están del mismo lado.

Los químicos K. Ziegler y G. Natta se hicieron acreedores al Premio Nobel de química en 1963 por su descubrimiento de catalizadores estereoespecíficos.

El hule es, entonces, una macromolécula que puede ser obtenida a partir del látex de diversas plantas o prepararse sintéticamente en el laboratorio. Éste será también el orden que seguiremos en este capítulo. Trataremos inmediatamente los polímeros sintéticos, como el nailon, el polietileno, el teflón o los silicones, y al final las macromoléculas de origen biológico, como la celulosa, la seda y el ADN.

TIPOS DE REACCIÓN PARA PREPARAR POLÍMEROS SINTÉTICOS

Según los principales tipos de reacción por los cuales se tienen polímeros, éstos se clasifican como *polímeros de adición o de condensación*. En los primeros se adicionan monómeros que contienen una doble ligadura $\text{C}=\text{C}$, en un proceso facilitado por la presencia de un catalizador. En los segundos se forman largas cadenas como resultado de la combinación de dos moléculas diferentes (monómeros), mediante la pérdida de alguna molécula pequeña, generalmente agua.



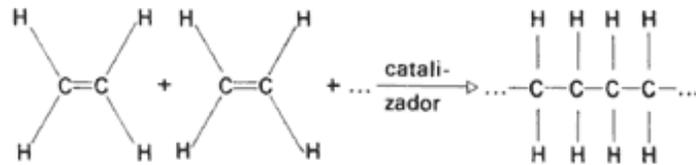
POLIETILENO: UN POLÍMERO POR ADICIÓN

El compuesto más sencillo que puede tener una reacción de polimerización por adición es el etileno $\text{CH}_2=\text{CH}_2$. El polímero resultante, el polietileno, es el más barato y el que se produce en mayor cantidad en el mundo. Las llamadas bolsas de plástico están hechas de polietileno.

La materia prima, el etileno, se obtiene por la eliminación de dos átomos de hidrógeno del etano, el segundo componente más importante del gas natural (véase la fórmula 27). En La Cangrejera, PEMEX fabrica tanto el monómero como el polietileno de baja densidad.

La doble ligadura es la razón de la reactividad de este compuesto. Con la presencia del catalizador adecuado tiene

lugar la polimerización (véase la fórmula 38).



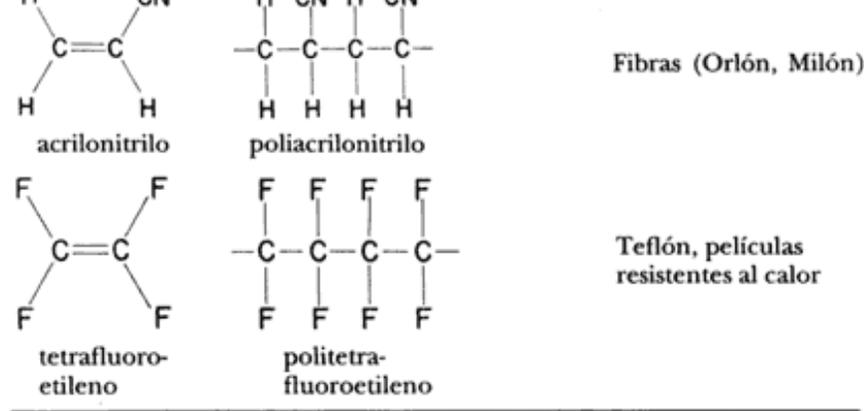
Fórmula 38. La polimerización del etileno constituye un buen ejemplo del uso de catalizadores para unir pequeñas moléculas de una forma específica, y así producir un polímero.

DERIVADOS DEL ETILENO

Se puede obtener una tremenda variedad de moléculas al sustituir los átomos de hidrógeno en el etileno por otros átomos o grupos de átomos, así como también una gran variedad de polímeros de adición, como se muestra en el cuadro 10.

CUADRO 10. Algunos polímeros de adición.

<i>Monómero</i>	<i>Polímero</i>	<i>Usos principales</i>
$ \begin{array}{c} \text{H} & & \text{H} \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{H} \end{array} $ <p>etileno</p>	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \\ & & & \\ -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $ <p>polietileno</p>	bolsas, botellas, juguetes
$ \begin{array}{c} \text{H} & & \text{CH}_3 \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{H} \end{array} $ <p>propileno</p>	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{CH}_3 & \text{H} & \text{CH}_3 \\ & & & \\ -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $ <p>polipropileno</p>	botellas, detergente, artículos moldeados
$ \begin{array}{c} \text{H} & & \text{C}_6\text{H}_5 \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{H} \end{array} $ <p>estireno</p>	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{Cl} & \text{H} & \text{Cl} \\ & & & \\ -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $ <p>poliestireno</p>	artículos moldeados, espuma aislante
$ \begin{array}{c} \text{H} & & \text{Cl} \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{H} \end{array} $ <p>cloruro de vinilo</p>	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 & \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \\ & & & \\ -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $ <p>cloruro de polivinilo (PVC)</p>	Discos fonográficos, películas, artículos de piel artificial, mangueras
$ \begin{array}{c} \text{H} & & \text{CN} \\ & \backslash & / \\ & \text{C}=\text{C} \\ & / & \backslash \\ \text{H} & & \text{H} \end{array} $	$ \begin{array}{c} \text{H} & \text{CN} & \text{H} & \text{CN} \\ & & & \\ -\text{C} & -\text{C} & -\text{C} & -\text{C}- \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array} $	Fibras (Orlón, Milón)



Una vez que los monómeros se transforman en polímeros se incrementa notablemente el valor del producto. Veamos la figura 16. El valor (en 1984) de una tonelada de etileno era de 425.9 dólares. Si esa tonelada se emplea para fabricar cloruro de vinilo (el monómero del PVC), su valor aumenta 51%. Si con ella se obtiene polietileno, aumenta 55%. Ésta es la *magia* de la petroquímica, sus efectos dan a los productos valor agregado, el cual se maximiza si se llega hasta los productos de consumo terminal.

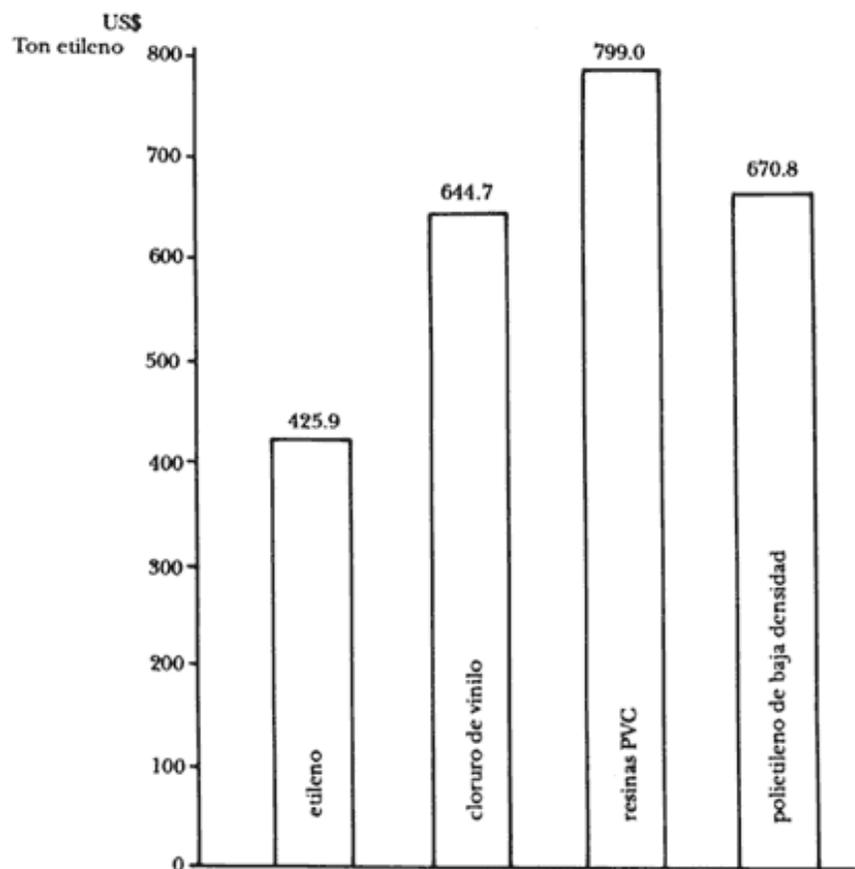


Figura 16. Precio en dólares por tonelada de etileno empleada para la fabricación de algunos de los productos del cuadro 10. La cifra representa el valor del petroquímico al ser exportado (E), o al que se lo compra, en caso de que se importe (I). Fuente: *Análisis de la industria petroquímica por cadenas productivas*, Comisión Petroquímica Mexicana, México 1986.)

La solución no es difícil. Si el tetrámero de la fórmula 45 fuese lineal, y no ramificado, el detergente podría ser biodegradado. Estos detergentes con cadena lineal son un poco más costosos, pero afortunadamente ya va generalizándose su producción y consumo. Actualmente una buena proporción de los detergentes líquidos que se encuentran en el mercado ya tienen dodecilsulfonato lineal, perfectamente biodegradable. Otra aportación de la química contra la contaminación.

EL UNO, DOS, TRES DE LOS PLÁSTICOS

Hay al menos tres factores que determinan las propiedades del polietileno y, en general, de los polímeros:

- 1) El *grado de polimerización*. Un polímero con una cadena de 10 átomos de carbono es, obviamente, diferente de uno en el que las cadenas sean de 10 000 átomos. Los de cadenas largas son más fuertes, pues son más fibrosos que los de cadenas cortas.
- 2) El *grado de cristalinidad*. Ya comentamos que una cadena polimérica puede imaginarse como una tira de espagueti que se dobla de muchas y variadas maneras: es amorfa. Sin embargo, es posible ordenar estas cadenas, al menos parcialmente, para obtener zonas cristalinas.

Básicamente, hay dos tipos de polietileno: el de baja y el de alta densidad. Ambos son producidos mediante diferentes catalizadores y condiciones de reacción. El polietileno de alta densidad, parcialmente cristalino, se utiliza, entre otras cosas, en la fabricación de juguetes, botellas y gabinetes de radio y televisión. El de baja densidad, amorfo, se emplea para hacer bolsas y como aislante eléctrico. Sin embargo, las películas para envolver los alimentos y mantenerlos frescos se hacen con polietileno de alta densidad, que es menos permeable, y por lo tanto conserva mejor la humedad natural de los alimentos.

- 3) El *grado de reticulación*. Este se logra cuando unas cadenas están unidas a otras por fuertes enlaces. Con esto el polímero adquiere gran fuerza y rigidez. La vulcanización del hule es, precisamente, la forma de aumentarle el grado de reticulación.

GRUPOS FUNCIONALES EN QUÍMICA ORGÁNICA

Un grupo funcional es la parte reactiva de una molécula. La presencia de un determinado conjunto de átomos provoca que todas las moléculas que contengan un grupo dado experimenten reacciones químicas similares. Algunos ejemplos de grupos funcionales son los siguientes:

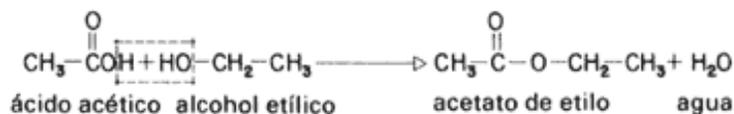
-OH hidroxilo **-COOH carboxilo** **-NH₂ amino**

Cada grupo funcional le confiere propiedades particulares a la cadena de carbono a la cual está unido. Por ejemplo, centrémonos en el grupo hidroxilo. Los compuestos que lo incluyen se llaman *alcoholes*. Los más sencillos de estos compuestos son el metanol, **CH₃-OH**, el etanol, **CH₃-CH₂-OH**, y el propanol, **CH₃-CH₂-CH₂-OH**. Los tres presentan las reacciones químicas típicas del grupo hidroxilo. Sin embargo, el diferente tamaño de la cadena afecta otras de sus propiedades. Por ejemplo, mientras que el metanol es venenoso (su ingestión provoca ceguera y hasta la muerte), el etanol está presente en todas las bebidas alcohólicas. Cabe aclarar que no por ello deja de ser tóxico.

POLIMERIZACIÓN POR CONDENSACIÓN

En este tipo de polimerización toman parte dos moléculas con diferentes grupos funcionales. Al reaccionar se desprende una molécula más pequeña, que por lo general es de agua.

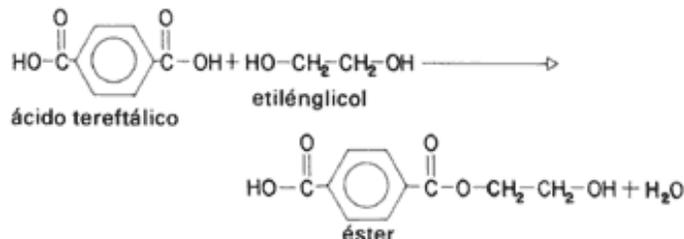
Un ejemplo sencillo de una reacción de condensación es la del ácido acético (el ácido del vinagre) con el etanol (véase la fórmula 47).



Fórmula 47. En esta reacción de condensación, el agua se forma a partir del -H del ácido y el OH- del alcohol. Los dos fragmentos restantes se reúnen para formar un éster.

El producto de una reacción como ésta (ácido + alcohol) es llamado genéricamente *éster*. El acetato de etilo es un éster.

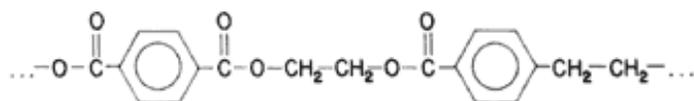
Esta reacción, llamada de *esterificación*, es la base para la fabricación de las fibras poliéster. En este caso se toma una molécula con dos grupos carboxilo (un diácido), como el ácido tereftálico (véase la fórmula 48), y otra molécula con dos grupos funcionales hidroxilo, como el etilenglicol (en los países fríos también se lo utiliza como anticongelante en los motores de automóviles).



Formula 48. Primer paso de la esterificación de un diácido con un dialcohol.

Inicialmente se produce un éster con un grupo carboxilo libre, por un lado, y un grupo hidroxilo, por el otro (véase la fórmula 48).

Posteriormente, ambos grupos libres pueden seguir reaccionando con otras moléculas. El proceso continúa hasta obtenerse largas cadenas de poliéster; el polietilentereftalato (PET) (véase la fórmula 49).



Fórmula 49. En la reacción de la fórmula 48 quedó libre un grupo ácido, HOOC-, y un grupo alcohol, -HO, así que es posible la condensación de más unidades monoméricas hasta producir el polietilentereftalato; la fibra poliéster, un magnífico sustituto del algodón.

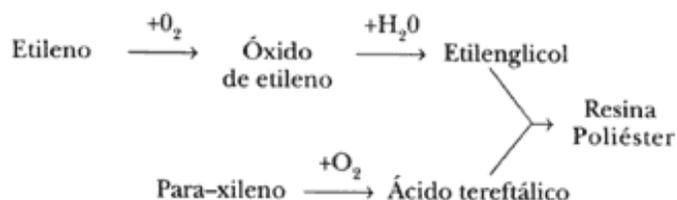
El uso más común del polietilentereftalato es la fabricación de fibras textiles y películas transparentes, que se emplean para las cintas de grabadora y para empaçar alimentos congelados.

Es altamente probable que usted, amable lector; vista ahora alguna ropa con multitud de macromoléculas de un poliéster. Es más, algunos lectores quedarían completamente desnudos si les pidiéramos que se quitaran todas las prendas con estas fibras.

Recientemente se ha logrado que esta resina alcance un alto grado de cristalinidad, lo que la ha convertido en el termoplástico más rígido. Varias compañías automotrices lo han incluido para reemplazar diversas piezas metálicas.

DE VUELTA A LAS CADENAS PRODUCTIVAS

Este ejemplo de las resinas poliéster nos permite hacer un breve alto para analizar la complejidad del árbol de la petroquímica. El siguiente diagrama muestra la cadena productiva que conduce al polietilentereftalato.



Basta que recordemos que, a su vez, el etileno provino del hidrocarburo de dos carbonos del gas natural (el etano), y el para-xileno fue un producto del tren de aromáticos de la refinería.

Debe quedar claro para el lector que para realizar la producción de fibra poliéster (para ropa, por ejemplo) no debe fallar ninguna de las etapas anteriores. Si por algún error o contingencia se frena un paso de la cadena de producción, la única salida es importar cierta cantidad de un petroquímico intermedio. Desafortunadamente, eso ocurre con cierta frecuencia. En ocasiones sucede por fallas imprevisibles de carácter técnico o de materia prima; en otras, por errores humanos, y en otras más, por deficiente planeación, cuando se retrasan los proyectos de inversión. Es por esto que en México la demanda de algunos productos básicos ha superado la oferta, por lo que ha sido necesario importarlos, cada vez en mayores cantidades.

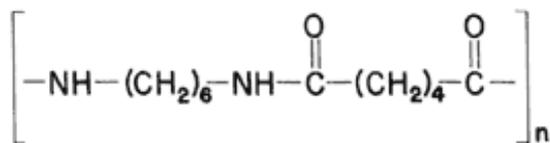
LA REVOLUCIÓN DEL NAILON

Otros dos grupos funcionales que suelen adicionarse, con la subsecuente eliminación de agua, son los carboxilos (**-COOH**) y las aminas (**-NH₂**). El resultado es un compuesto que se conoce con el nombre de *amida*, caracterizado por el enlace **-CONH-**. Esta reacción es precisamente la que lleva a cabo nuestro cuerpo para fabricar proteínas, como veremos más adelante.

Si, como se planteó para el caso del poliéster; se hacen reaccionar dos compuestos, uno con dos carboxilos y el otro con dos aminas, se obtiene una *poliamida*.

La reacción entre el diácido de seis carbonos (ácido adípico) y la amina de seis carbonos (la hexametilediamina) produce una poliamida muy especial, llamada *nylon 6,6* (véase la fórmula 50).

El nailon es un sólido opaco, blanco, que se utiliza principalmente para hacer fibras textiles. Fue preparado originalmente el 28 de febrero de 1935 por el químico Carothers, en los laboratorios de la compañía Dupont.



Fórmula 50. Nylon 6,6. La letra *n* indica que un gran número de las unidades encerradas entre paréntesis se repiten, una tras otra, formando la cadena polimérica.

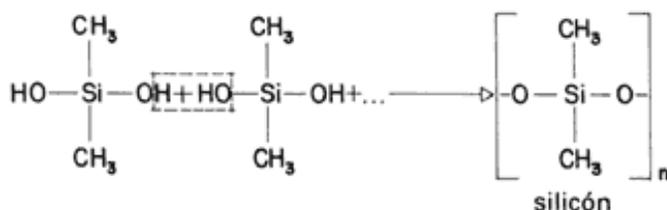
Durante la segunda Guerra Mundial, cuando Japón cerró el acceso a la seda del Lejano Oriente, el nailon probó ser una fibra superior por muchas de sus propiedades. En ese momento se lo utilizó para elaborar artículos militares, como cuerdas para barcos y paracaídas. Posteriormente, su uso en medias femeninas aumentó enormemente su popularidad.

Aunque parezca cuento, se han producido películas de nailon diez veces más delgadas que el pelo humano. Se usa también en cuerdas para llantas automotrices y en artículos moldeados.

Las fibras de nailon son muy fuertes, mucho más que cualquiera de las fibras naturales. Otra propiedad de las telas de nailon es que se secan fácilmente. Posteriormente, cuando discutamos la estructura de los carbohidratos, como el algodón, veremos que estas moléculas tienen muchos grupos hidroxilo, **-OH**, los cuales son muy afines al agua. Por ello el algodón es más difícil de secar que el nailon.

SILICONES

Existen polímeros de condensación no formados por átomos de carbono. Así, por ejemplo, dos moléculas de dihidroxisilano reaccionan entre sí para producir una molécula con enlace **Si-O-Si**. Esta molécula puede reaccionar de nuevo hasta producir una macromolécula de *silicón*, como se la llama (véase la fórmula 51).



Fórmula 51. El silicón, formidable sellador, es el polímero por condensación del dihidroxisilano.

La primera huella del hombre en la Luna fue hecha con una bota de silicón.

Hay muchos tipos de silicones, que resultan de emplear diferentes monómeros (puede cambiarse el **CH₃** por otros grupos). Los aceites, las grasas y los *hules* de silicón son mucho más resistentes al calor y al ataque de los productos químicos que sus equivalentes derivados del carbono. Esto los ha hecho muy útiles en medicina, para fabricar prótesis, y como selladores y aislantes en determinadas industrias. Son también ampliamente utilizados en electrónica para la fabricación de circuitos integrados. En 1940 apenas se produjeron algunas pocas toneladas en el mundo. No obstante, en 1969 fueron 100 000 y hoy se producen más de 400 000 toneladas.

ÁCIDO SULFÚRICO: DIME CUÁNTO PRODUCES Y TE DIRÉ CUANTO VALES

Alrededor de 90% de la producción mundial del azufre se utiliza para preparar ácido sulfúrico, H_2SO_4

Ya que éste ha sido catalogado como el producto químico industrial más importante de todos, no se puede dejar de mencionarlo en este viaje del tequesquite al ADN.

Como 60% del ácido sulfúrico producido se emplea para preparar fertilizantes y el resto en importantes empresas fabricantes de resinas sintéticas, papel, detergente y biocidas, la producción de ácido sulfúrico de un país es un buen indicador de su desarrollo industrial.

Como, se mencionó, la producción de H_2SO_4 parte del azufre. Este se obtiene tanto de yacimientos naturales como a partir del sulfuro de hidrógeno, H_2S , que acompaña al gas natural. El azufre se quema en presencia de oxígeno y un catalizador, con lo que se obtiene el óxido SO_2 , que con la adición de agua se transforma en ácido sulfúrico.

Los óxidos del azufre también se producen al quemar combustibles que contienen azufre, y son peligrosos contaminantes atmosféricos. Esta es la razón para que se *desulfurice* la gasolina. La presencia de estos óxidos en el aire da lugar a la llamada lluvia ácida, ya que basta el contacto con el agua para que se formen ácidos, como el sulfúrico.

La lluvia ácida perjudica tanto a las construcciones como a los seres vivos. Se estima que anualmente se lanzan unos 200 millones de toneladas de óxidos de azufre al aire del planeta, lo cual amenaza y destruye cotidianamente diversas especies acuáticas. La ciudad de México se encontraba fuertemente amenazada por este problema. En 1986 se informó que la acidez de la lluvia era diez veces mayor que la esperada para una atmósfera limpia. Afortunadamente, como se indicó en el capítulo II, actualmente se han podido controlar las emisiones de óxidos de azufre a la atmósfera.

ADITIVOS DE LOS PLÁSTICOS

Muy pocos de los polímeros que hoy se producen alcanzan su uso final sin una modificación. Para ello se cuenta con una gran variedad de aditivos que alteran de diversa manera sus propiedades. Los más comunes son los colorantes y los pigmentos, pero existen otros, como los agentes espumantes, los plastificantes, los materiales de relleno y los estabilizadores. Comentaremos brevemente algunas de sus características.

Los agentes espumantes son hidrocarburos de bajo punto de ebullición que se agregan al plástico. Con el calentamiento, o por una presión reducida, el hidrocarburo se evapora y produce burbujas en el plástico. El llamado *hule espuma* de poliuretano y la espuma de poliestireno son preparados de esta manera. Los plásticos *espumados* tienen menor densidad y son mejores aislantes térmicos.

Los plastificantes son sustancias que les imparten flexibilidad a los polímeros. Actúan como lubricantes internos que separan las cadenas poliméricas. El PVC es quebradizo y se rompe fácilmente, pero con la adición de plastificantes se vuelve suave y flexible. Con PVC modificado se fabrican productos como muñecas, paraguas, accesorios de jardín, tubos protectores de instalaciones eléctricas y asientos de automóviles.

En ocasiones se agregan al plástico materiales de relleno que reducen el costo del producto final y mejoran sus propiedades físicas y mecánicas. Los más utilizados son materiales fibrosos, como el asbesto y la fibra de vidrio. Por ejemplo, los poliésteres reforzados con fibra de vidrio tienen amplio uso para fabricar lavabos, carrocerías de vehículos de mar y tierra, y otros objetos diversos.

Muchos de los plásticos empleados en artículos que están expuestos a la luz solar terminan por perder su resistencia original y se vuelven quebradizos. La razón de ello es que la luz ultravioleta, presente en la radiación solar, es capaz de romper algunos de los enlaces químicos de los polímeros. Para evitarlo se agregan moléculas estabilizadoras que absorben la luz ultravioleta y liberan la energía recibida como calor.

¿CONTAMINACIÓN MACROMOLECULAR?

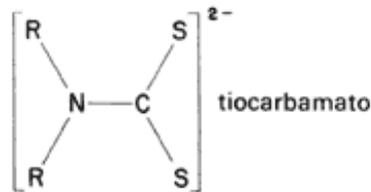
Gran parte de la producción de plásticos es eliminada en forma de desechos... pero esto es un decir. Uno de los más graves problemas asociados con los plásticos es su indestructibilidad. Todos sabemos de la presencia de bolsas, botellas y otros objetos de plástico en playas, ríos, lagunas y predios. Conservadoramente se estima que en

el mundo, cada año, alrededor de 250 000 toneladas de plástico tienen como destino final el medio ambiente, en donde se acumulan como basura. En algunas ciudades, parte de ese plástico se recicla y sirve posteriormente para la producción de bolsas.

Estos objetos plásticos, que están por todas partes, no son biodegradables, al igual que algunos detergentes. Debido al gran tamaño de las moléculas de éstos, los microorganismos bacterianos, responsables de la degradación de muchos de los desechos sólidos, son incapaces de atacar a los plásticos. Por otro lado, su combustión puede desprender gases tóxicos, principalmente ácido cianhídrico (que es, nada menos, el de la cámara de gases) y clorhídrico, de ahí que quemarlos no sea una solución para eliminarlos.

La proliferación de basura plástica puede resolverse, pero hace falta que todos participemos. La manera más sencilla de hacerlo es el *reciclaje*. Si todos clasificáramos nuestra basura y separáramos los objetos plásticos de los de vidrio, metal y materia orgánica, la reutilización de plásticos, metales y vidrio sería más factible.

Otra salida posible es el uso de aditivos que realicen la función inversa a la de los estabilizadores, es decir, que tiendan a destruir el material. Se ha demostrado que un tipo de aditivos sensibles a la luz induce la ruptura de las cadenas poliméricas después de cierto tiempo de exposición, lo cual facilita su posterior degradación bacteriana. Los compuestos llamados tiocarbamatos (véase la fórmula 52) empiezan a usarse con este propósito. Sus efectos pueden apreciarse claramente en la figura 17.



Fórmula 52. Algunos de los aditivos para fotodegradar los plásticos son tiocarbamatos de metales de transición. Aquí se muestra el ion tiocarbamato.

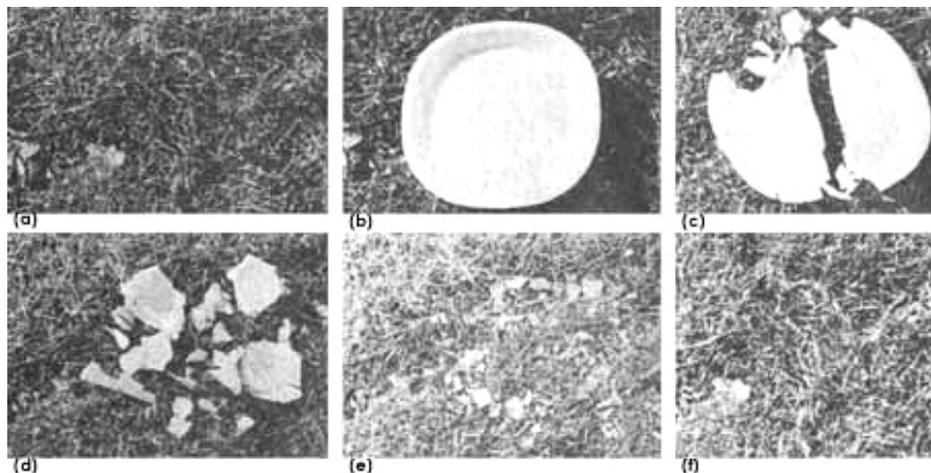


Figura 17. Esta secuencia de fotos muestra la descomposición fotoquímica de un plato de plástico. a) Sin plato. b) El plato se incorpora al jardín. c) En 30 a 90 días el plato se rompe. d) En 60 a 120 días el plato está completamente roto. e) Entre 90 a 150 días sólo quedan fragmentos. f) De seis a doce meses después no hay restos del plato en el jardín. (Tomada de J. W. Hill, *Chemistry for Changing Times*, Burgess, Minneapolis, 1980).

No obstante los éxitos iniciales de este tipo de aditivos, no han sido incorporados sistemáticamente en las formulaciones de los plásticos, al menos en nuestro país.

Adicionalmente, algunos de los plastificantes más usados, como los bifenilos policlorados, han sido encontrados en los tejidos de vacas, perros y conejos. Sus efectos tóxicos son considerables. Se ha demostrado que dichas sustancias producen mutaciones en animales de laboratorio. Por ello, actualmente algunos de estos plastificantes se han eliminado del mercado.

Al igual que en las demás áreas en las que la contaminación es crítica, en el terreno de los plásticos habrá de desempeñar un papel primordial la creación de una conciencia colectiva. Sin duda, los materiales plásticos han revolucionado al mundo, pero en el futuro su producción deberá acompañarse de soluciones globales, de tal forma que sean más los problemas que resuelvan que los que creen. Sin embargo, para lograr la producción de plásticos con mínimo riesgo ecológico existe una limitante, que es el problema de siempre: el económico. De todas formas, es necesario que tratemos de resolver este problema de la mejor manera posible, con los recursos a nuestro alcance.

LAS TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO

De plástico hay hilos y pelotas, mangueras y gabinetes de radio, sillas y peines. Cada objeto merece un procedimiento especial que conduce a su producción. El diseño de los aparatos para moldear los plásticos en esos objetos útiles que están presentes a nuestro alrededor no corresponde al químico, sino al ingeniero.

Por ejemplo, los hilos se producen por la técnica de extrusión, por medio de la cual se bombea el plástico a muy alta presión y se le hace atravesar una criba con delgadísimos agujeros. Por extrusión se fabrican también mangueras y láminas para el recubrimiento de fachadas, paredes o muebles.

Los objetos abiertos se obtienen por inyección del plástico en moldes fabricados *ex profeso*, mientras que para objetos cerrados (pelotas, por ejemplo) se utiliza la técnica de moldeo por rotación.

Finalmente, se acostumbra producir las botellas plásticas por la técnica de soplado, en la que aire a presión fuerza al plástico a recubrir las paredes interiores de un molde.

Existe una infinidad de máquinas para procesar objetos plásticos, y cada una sigue ciertas reglas para su adecuado funcionamiento y diseño.

Nuestro país cuenta con una importante industria de procesamiento de polímeros, que ocupa a una notablemente alta proporción de mano de obra, en relación con el capital de inversión que requiere. No obstante, durante muchos años se ha manejado con máquinas de importación y con el aprendizaje empírico que le ha dado la misma actividad productiva. Es por ello que las industrias sobre todo las pequeñas, no siempre pueden resolver los problemas que se presentan, por lo que la producción deja de ser óptima y acaba por afectar los costos del producto. Sin duda, es imperativo que los centros educativos ayuden a la industria y combatan esta deficiencia en la formación de profesionales especializados en el campo de los plásticos, su síntesis y procesamiento.

Desde el punto de vista básico, el problema no es nada sencillo. Entender cómo hacer fluir controladamente a un plástico a través de la maquinaria de procesamiento es un muy serio problema de flujo de fluidos. Igualmente, lograr un proceso para obtener un nuevo polímero es otro serio problema de química sintética. No se pueden improvisar profesionales que aborden estos delicados temas.

A pesar de que en México la investigación sobre materiales poliméricos se encuentra en una etapa temprana, ya existen varios grupos importantes, no sólo en el Distrito Federal, sino también en los estados (en Monterrey, Saltillo y Hermosillo), comprometidos con la formación de posgraduados en esta especialidad. En la Universidad de Sonora se hace hincapié en aspectos tanto básicos como aplicados de la ciencia de los polímeros. En el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), en Saltillo, la investigación tiene un carácter más práctico e industrial.

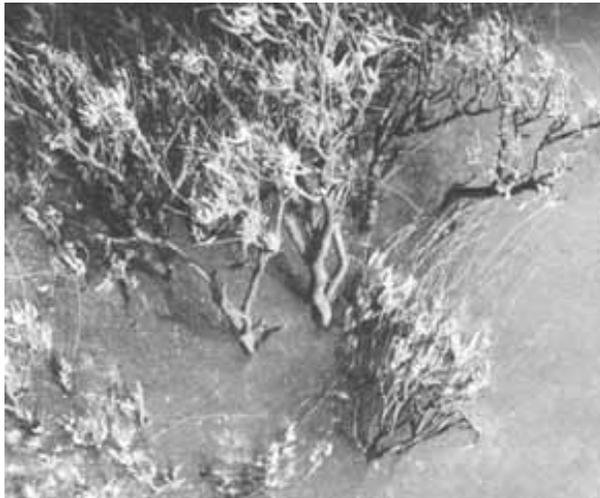


Figura 18. Arbusto del guayule. Una de las primeras investigaciones realizadas en el CIQA consistió en la extracción y el aprovechamiento del hule del guayule, que es un arbusto que abunda en nuestras zonas áridas.

ASPECTOS DE LA INDUSTRIA DE LOS POLÍMEROS

Es tal la cantidad de objetos de plástico que se fabrican actualmente, que se puede decir que estamos en la era de los plásticos. En países como Alemania y Estados Unidos el consumo volumétrico de materiales plásticos es ya superior al del acero. El cuadro 11 muestra cómo ha evolucionado la producción de plásticos en México y en el resto del mundo. Aquellos con volumen más grande de producción mundial son: polietileno (35%), policloruro de vinilo (21%) y poliestireno (10%).

CUADRO 11. Evolución de la producción de plásticos en México y en el mundo.

<i>Año</i>	<i>Producción mundial (Miles de ton)</i>	<i>Producción de México (Miles de ton)</i>
1940	350	
1950	700	
1960	6 200	
1970	25 000	136
1980	60 000	576
1990	90 000	1 400

PLÁSTICOS DE INGENIERÍA

Más de 70% de la producción mundial y mexicana de plásticos corresponde a los llamados *plásticos de consumo*, como el polietileno, el PVC el polipropileno y el poliestireno.

Otros tipos de plásticos, llamados *de ingeniería*, tienen mayor resistencia al calor y al impacto que los de

consumo. A pesar de que constituyen alrededor del 2.5% de la producción mundial, representan, por sus propiedades particulares, aproximadamente 8% del valor total de la producción.

La disponibilidad de estos materiales hizo que su aplicación en mercados especiales, como el electrónico, el aeronáutico y el automotriz, creciera pronunciadamente.

Además de los de ingeniería, existen los plásticos *de especialidad*, como ciertos poliimidas y plásticos biomédicos, que hasta hace poco eran considerados curiosidades de laboratorio. Estos representan cerca de 0.1% de la producción mundial.

Actualmente los países desarrollados están cerrando plantas productoras de plásticos de consumo debido, entre otras cosas, a que hay una gran competencia con los países productores de petróleo. Por esta razón se están enfocando a la producción de plásticos de ingeniería de especialidad, cuyos costos son, respectivamente, de 4 a 100 veces mayores que los de los plásticos de consumo (véase la figura 19).

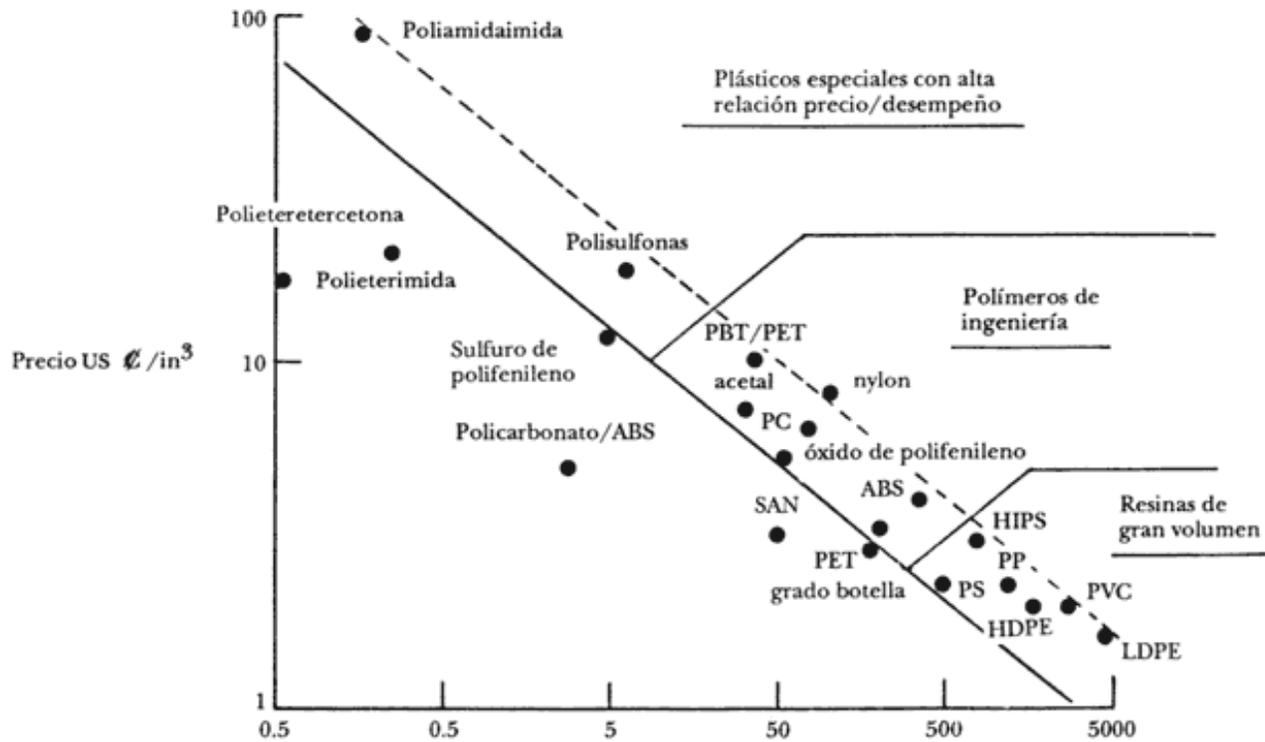


Figura 19. Relación precio/volumen de producción para las resinas de consumo y de ingeniería. (Fuente: Comisión Petroquímica Mexicana-SEMIP, *Plásticos de ingeniería*, México, 1986.)

LA SITUACIÓN EN MÉXICO

En el año de 1950, con la producción de poliestireno empezó a funcionar la primera planta polimerizadora del país. Tres años después, tanto en Monterrey como en la ciudad de México iniciaron operaciones dos plantas productoras de PVC. Anteriormente, todo el plástico se importaba, bien como productos terminados o como maquinaria y materias primas.

En la década de los sesenta se inicia la integración vertical, con la producción nacional de moldes y equipo auxiliar, así como de monómeros (PEMEX en 1966 produce polietileno de baja densidad).

En los setenta, la industria de polímeros se expande ampliamente debido al incremento de la demanda nacional, y

se exportan algunos productos. Este crecimiento originó fuertes importaciones, tanto de monómeros como de bienes de capital, y así, paradójicamente, el auge del petróleo acarrió un déficit de monómeros.

En 1981, antes de la crisis económica, ya se importaban 315 000 toneladas de petroquímicos básicos, las dos terceras partes del consumo nacional. Hacia 1984, las importaciones de los dos principales básicos (etileno y propileno) sumaron 220 millones de dólares. No obstante, continúa la exportación de PVC, fibra poliéster y algunos productos manufacturados.

En el cuadro 12 se muestra el consumo aproximado de plástico per cápita en algunos países en 1983.

CUADRO 12. Consumo per cápita de plásticos (1983), en kg/habitante.

Alemania	106
EUA	78
Japón	65
Brasil	16
México	12
Argentina	11
En el mundo	15

En nuestro país, alrededor de 32% de la producción está destinada a objetos de embalaje y envase. Otros mercados importantes son la construcción, los electrodomésticos y los juguetes. Menos de 1% está representado por el sector agrícola.

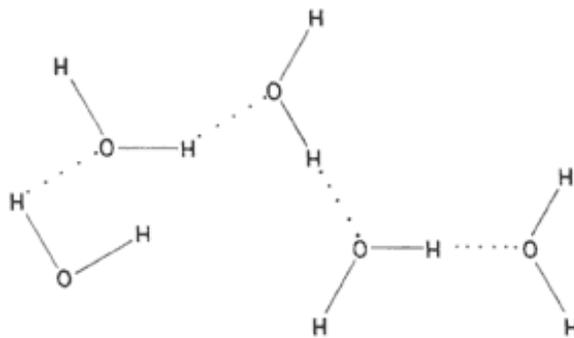
A pesar de su integración desarticulada, la industria de los polímeros le otorga al petróleo, materia prima de prácticamente todos los monómeros, un alto valor agregado. Por ello este sector tiene gran importancia en el desarrollo económico y tecnológico de nuestro país.

EL ENLACE POR PUENTE DE HIDRÓGENO

Antes de ingresar en el mundo de las macromoléculas que forman parte de los organismos vivos, y dada su importancia en estos sistemas, conviene que el lector se familiarice con un tipo de enlace especial, llamado *puente de hidrógeno*.

Cada molécula conserva su estructura debido a la fuerza de los enlaces químicos que mantienen unidos a sus átomos. Ahora bien, una molécula de un compuesto puede interactuar con el resto de las moléculas de la misma sustancia. De la magnitud de esta interacción intermolecular, que es menor que la del enlace químico, dependen muchas propiedades de las sustancias. Estas fuerzas son responsables, por ejemplo, de la existencia de los líquidos y los sólidos. Si no existieran atracciones intermoleculares, toda la materia sería gaseosa.

En ciertos compuestos que contienen hidrógeno, las fuerzas intermoleculares son especialmente fuertes. El agua es el primer caso notable (véase la fórmula 53). Por ello es que el agua es un líquido en las condiciones ambientales normales de la Tierra, lo cual ha hecho posible la aparición de vida en el planeta.



Fórmula 53. En el agua se establece un débil enlace intermolecular entre el oxígeno de una molécula y el hidrógeno de otra. Debido a ello el agua es líquida en condiciones ambientales, y es necesario emplear calor para romper los enlaces de hidrógeno y vaporizarla.

Es muy frecuente la presencia del enlace por puente de hidrógeno, el cual ocurre entre un hidrógeno (que generalmente presenta una ligera carga positiva) y un átomo sobre el cual exista una carga negativa neta (generalmente es el oxígeno, aunque el flúor y el nitrógeno también son buenos ejemplos). Más adelante tendremos oportunidad de ver varios casos de este tipo de interacción, que es crucial en multitud de eventos biológicos.

MACROMOLÉCULAS NATURALES

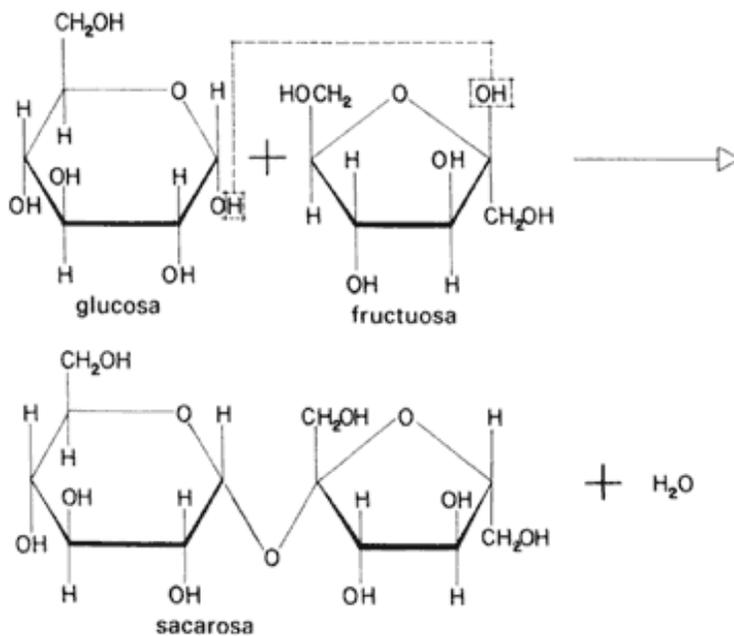
Nuestra piel, las plumas del pavo real, los cuernos de los toros, la seda, las garras de las águilas, la lana, el algodón, el ARN y el ADN, todos los aspectos de la vida misma están sustentados en las macromoléculas naturales. A continuación comentaremos algunos ejemplos específicos de ellas.

Tal vez el dímero más común en nuestras vidas sea la sacarosa, nombre químico del azúcar de mesa. Empecemos con él.

POLISACÁRIDOS

Los polisacáridos son polímeros de los azúcares, sustancias que llevan el nombre químico de *carbohidratos*. Éstos son compuestos formados por carbono, hidrógeno y oxígeno, los dos últimos en la misma proporción que en el agua, es decir, dos átomos de hidrógeno por cada átomo de oxígeno. Tal vez el carbohidrato más conocido sea la sacarosa, con fórmula $C_{12}H_{22}O_{11}$, pues es el azúcar que utilizamos comúnmente en las comidas.

La sacarosa es un disacárido, o sea, está formada por dos moléculas de carbohidratos (monosacáridos) que se unen por condensación (véase la fórmula 54), con la eliminación de una molécula de agua. Uno de ellos, la glucosa $C_6H_{12}O_6$, es el carbohidrato más utilizado por nuestro cuerpo como fuente de energía. El otro, la fructosa, un isómero con la misma fórmula, es el responsable del sabor dulce de algunas frutas. Precisamente de ahí toma su nombre.



Fórmula 54. La sacarosa, o azúcar común, es disacárido. Para simplificar, no se muestra que en cada vértice de los hexágonos y pentágonos hay un átomo de carbono, excepto en los que aparece el símbolo del oxígeno.

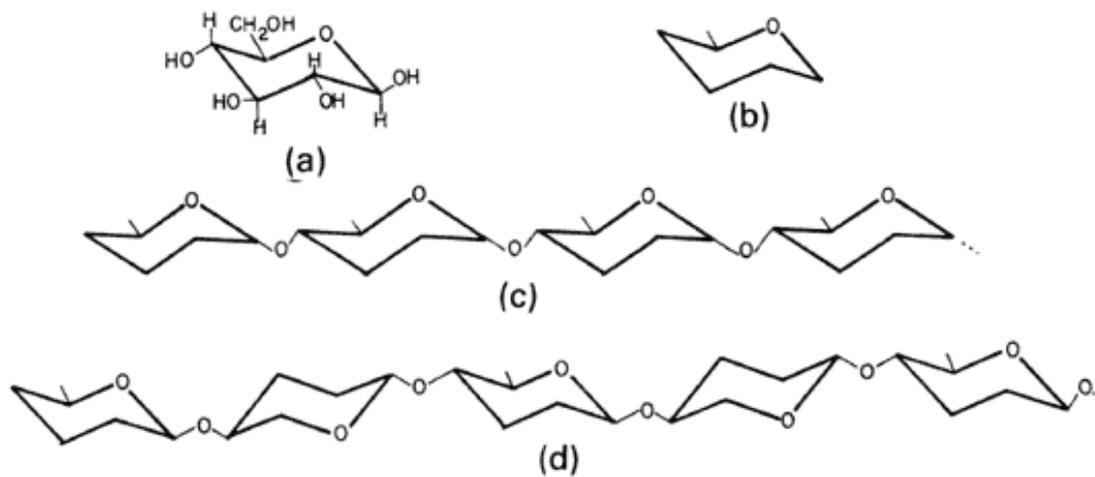
Otros disacáridos ampliamente conocidos son la lactosa, que se encuentra en la leche, y la maltosa, producto de la cebada.

La celulosa y el almidón son polisacáridos de la glucosa, donde el prefijo *poli* sí representa una multitud de moléculas de glucosa que se unen por condensación. La celulosa es uno de los principales elementos estructurales de las plantas, y el almidón constituye su reserva energética.

La celulosa es la sustancia orgánica más abundante en la tierra y únicamente algunas bacterias pueden digerirla, como las que se encuentran en el sistema digestivo de las termitas.

Por otra parte, una enorme cantidad de animales digiere el almidón, que es abundante en cereales y tubérculos, como el maíz y las papas.

La mayor diferencia estructural entre la celulosa y el almidón es la manera en que se unen las moléculas de glucosa, a través de uno de sus grupos **OH** (véase la fórmula 55).



Fórmula 55. a) La glucosa, que corresponde a la primera fórmula hexagonal de la fórmula 54, se muestra aquí en su acomodo espacial real. b) En ocasiones, la fórmula de (a) se simplifica de esta manera. c) Almidón. d) Celulosa. Los dos últimos son polímeros de la glucosa.

Esta diferencia puede parecer mínima, pero el resultado es espectacular.

a) En la celulosa, las moléculas de glucosa están colocadas en línea recta. Los enlaces por puente de hidrógeno entre cadenas vecinas dan lugar a estructuras relativamente rígidas, en las que hay pocas posibilidades de que penetren moléculas de agua. Al ser un polímero lineal, resulta óptima para construir microfibrillas, a partir de las cuales se constituyen todas las estructuras vegetales (del tallo, hojas y raíz).

b) Por el contrario, en el almidón las cadenas adquieren una configuración espiral, que hace al polisacárido menos rígido. Existe un menor número de enlaces por puentes de hidrógeno, así que el agua puede penetrar más fácilmente entre las cadenas. El almidón animal se encuentra en el hígado y los músculos. Se utiliza en las comidas como fuente de energía.

El algodón es la forma más pura de la celulosa. Contiene las fibras más largas, por lo que se emplea para fabricar ropa. Su capacidad de absorber agua se debe a que no todos sus átomos de oxígeno están contenidos en enlaces por puentes de hidrógeno, por lo que algunos de sus grupos -OH pueden interactuar con moléculas de agua. La celulosa de la madera es de fibra más corta y no se puede utilizar en la industria textil, pero sí para fabricar papel.

Tal como lo conocemos, el papel es un invento chino de hace aproximadamente 2 000 años. Hoy se puede fabricar con un grosor menor que el del cabello humano.

La pulpa de la madera puede emplearse también en la preparación de otros productos, como los siguientes:

- Nitrato de celulosa. Se utiliza en la fabricación de explosivos, lacas y plásticos.
- Acetato de celulosa. Se emplea para hacer las películas de cine y, en forma de fibra, como la materia textil llamada rayón.
- Xantato de celulosa. Es ampliamente conocido con el nombre comercial de celofán. Se usa también para fabricar cuerdas de llantas.

PROTEÍNAS O POLIPÉPTIDOS

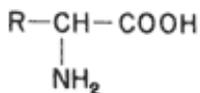
Las proteínas forman parte de todos los seres vivos y, como su nombre lo indica (proviene del griego *proteios*, que significa primero), son de primordial importancia para todos los organismos, desde un virus hasta una ballena. Participan en multitud de procesos biológicos esenciales, los cuales se resumen en el cuadro 13.

CUADRO 13. Función biológica de las proteínas.

<i>Tipo general</i>	<i>Función biológica</i>
Estructural	Constituyentes de pelo, lana, plumas (protección), músculos, seda, piel.
Respiratorio	Transporte y almacenaje de oxígeno.
Enzimático	Catálisis biológica. Reacciones de síntesis, oxidación, hidrólisis, etc.
Anticuerpos	Defensa del organismo contra el ataque de agentes extraños, como virus y bacterias.
Hormonal	Regulación del metabolismo.
Nucleoproteica	Transmisión hereditaria, síntesis de proteínas para formar tejidos.

Las proteínas son macromoléculas con pesos moleculares que van de 5 000 a varios millones de uma. La unidad fundamental (monómero) son los aminoácidos. A diferencia de los polisacáridos, en donde únicamente una molécula (la glucosa) se repite gran cantidad de veces, en las proteínas se tiene el agrupamiento de 20 aminoácidos diferentes. Por ello podemos decir que las proteínas son copolímeros. A partir de veinte diferentes monómeros, las posibilidades de construcción de polímeros son enormes, de allí que haya tal variedad de proteínas.

Los veinte aminoácidos naturales tienen en común la presencia de dos grupos funcionales, el grupo amino ($-\text{NH}_2$) y el ácido carboxílico ($-\text{COOH}$), colocado éste sobre el mismo carbono que soporta al amino.

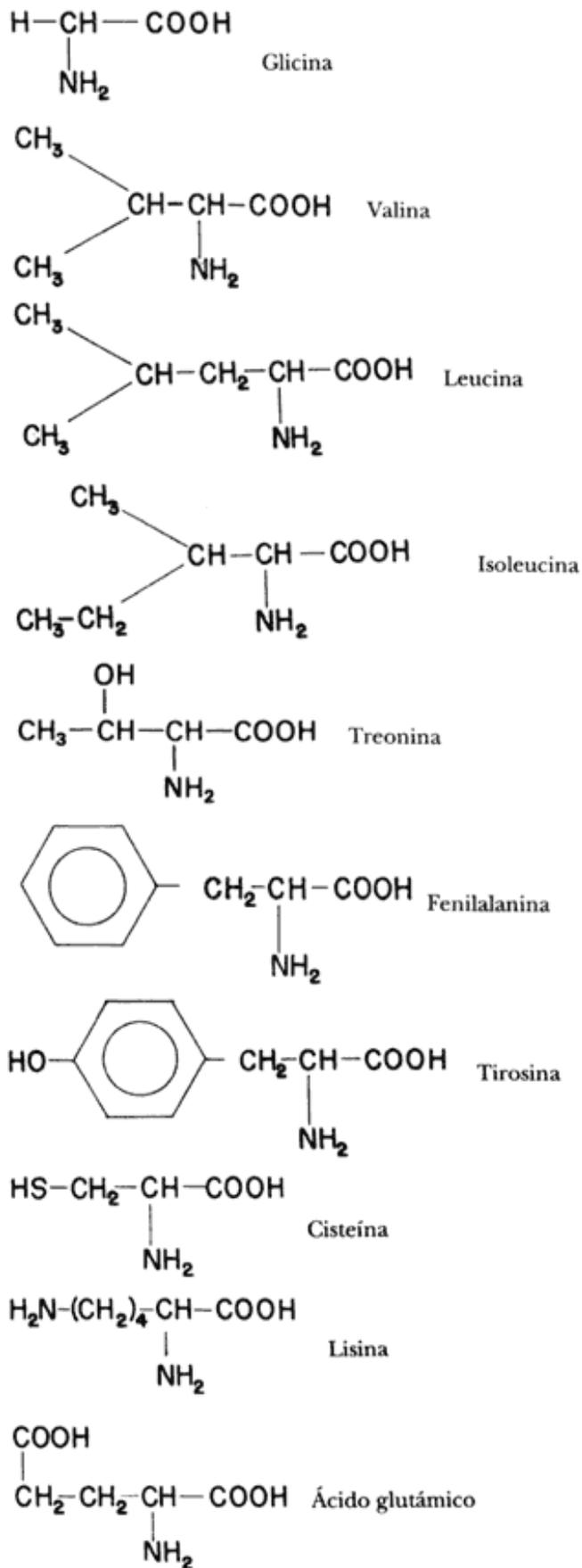


Fórmula 56. Estructura general de un aminoácido.

La fórmula 56 presenta la estructura general de un aminoácido y en el cuadro 14 se encuentran algunos ejemplos de los radicales *R*.

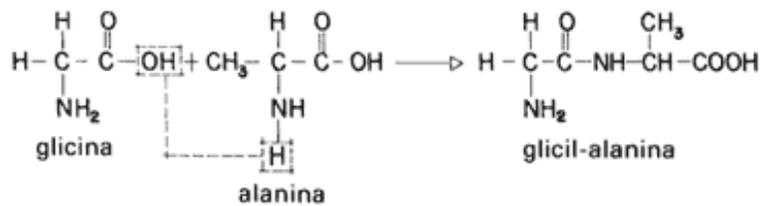
CUADRO 14. Algunos de los veinte aminoácidos naturales.

Fórmulas 57 a 66.



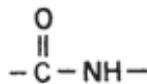
El aminoácido más simple es la glicina, en la que el radical **R** es un átomo de **H**. Al interactuar con otro

aminoácido, como la alanina, con $R=CH_3$, ambas moléculas se condensan, formando un *dipéptido* a través de la eliminación de una molécula de agua (véase la fórmula 67). El resultado descrito se denomina glicil-alanina.



Fórmula 67. Formación de un dipéptido. A partir de los aminoácidos más simples (glicina y alanina) puede formarse un dímero o dipéptido. Como se observa, la glicil-alanina contiene aún un grupo amino y un grupo ácido, por los cuales puede continuar reaccionando con otros aminoácidos para formar un polipéptido mayor.

Sin embargo, pudiera ocurrir que la molécula de agua se eliminara a partir del $-\text{OH}$ de la alanina y el H de la glicina, con lo cual se forma la alanil-glicina. Así, un par de aminoácidos pueden formar dos dipéptidos.



Fórmula 68. El enlace peptídico es el lazo de unión entre los residuos de los aminoácidos de un polipéptido.

El enlace que se forma entre los dos aminoácidos se conoce como *enlace peptídico* (véase la fórmula 68). Es el mismo que se presenta en la polimerización del nailon.

La reacción entre dos dipéptidos genera un tetrapéptido. A partir de cuatro aminoácidos diferentes que reaccionen en todas las combinaciones posibles se puede producir un gran total de veinticuatro ($4 \times 3 \times 2 \times 1$) tetrapéptidos. Si se utilizan 20 aminoácidos diferentes pueden obtenerse 2.43×10^{18} diferentes polipéptidos de veinte unidades, ¡nada menos que casi dos y medio trillones! Como vemos, hay una enorme cantidad de polipéptidos, de los cuales sólo una pequeña fracción constituye las proteínas de los seres vivos.

Desde luego, si pensáramos en combinar cualquier tipo de aminoácidos, y no sólo los 20 naturales, el número de polipéptidos sería impensable. La figura 20 presenta la secuencia de aminoácidos de una de las proteínas más simples.

ESTRUCTURA DE LAS PROTEÍNAS

La estructura de las proteínas es muy complicada, por lo que acostumbra analizarse en tres diferentes niveles.

La *estructura primaria* corresponde a la diferente secuencia de aminoácidos en la cadena polipeptídica (véase la figura 20).

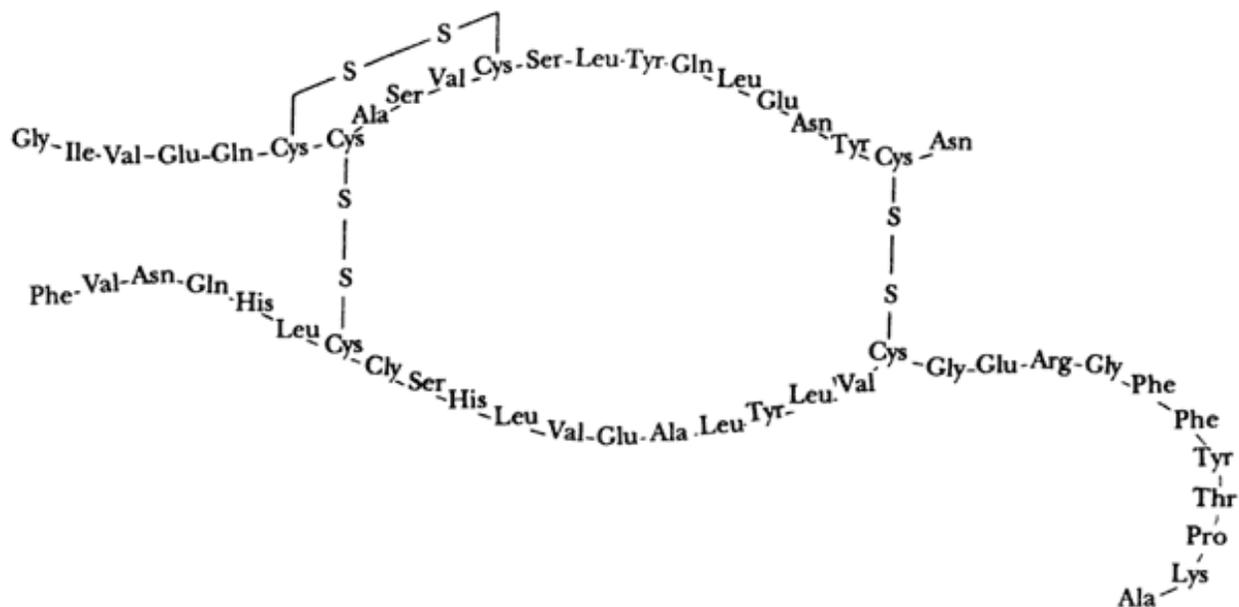


Figura 20. La insulina es una enzima producida por el páncreas que interviene en el metabolismo de los azúcares. Su ausencia causa la diabetes. Consiste de dos cadenas polipeptídicas con 21 y 30 residuos de aminoácidos. Ambas cadenas están enlazadas a través de puentes disulfuro provenientes del azufre de la cisteína. Cada terna de letras en la figura representa una abreviatura del nombre (en inglés) del aminoácido original (Gly=glucina, Val=valina, etcétera).

La *estructura secundaria* es el resultado de las interacciones entre diferentes porciones de la cadena proteica. En muchos casos tienen lugar a través de enlaces por puente de hidrógeno, lo cual origina que las cadenas adopten forma de hélice (véase la figura 21).

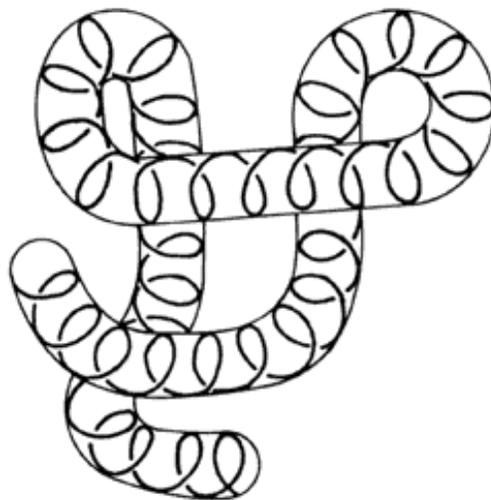


Figura 21. a) Las cadenas de polipéptidos pueden adquirir formas helicoidales. b) Su estructura de hélice se mantiene gracias a la presencia de enlaces de hidrógeno entre dos enlaces peptídicos que se encuentran a diferentes alturas.

El estadounidense Linus Pauling recibió el Premio Nobel de química en 1954 por sus estudios en la estructura de las proteínas. Años más tarde, su espíritu pacifista lo llevó también a obtener el Premio Nobel de la paz.

La *estructura terciaria* de las proteínas es consecuencia de la interacción entre las cadenas helicoidales a través, por ejemplo, de enlaces por azufre o de puentes de hidrógeno. Como resultado de ella, las hélices proteicas pueden adoptar diferentes formas (véase la figura 22).

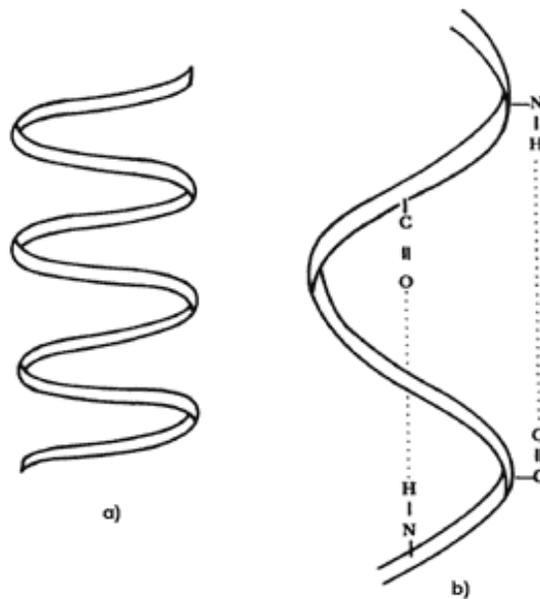


Figura 22. Las hélices de polipéptidos pueden doblarse y enrollarse en formas complejas, lo que dota a las proteínas de estructura terciaria.

Como resultado de esta complejidad estructural, la variedad de funciones que adoptan las proteínas es muy amplia, como ya mencionamos.

Por ejemplo, el pelo humano y las plumas de las aves están formados de queratina. Esta proteína adopta la forma de una fibra, similar a los cables marinos de siete cabos, que constan de una hélice central y otras seis arrolladas a su alrededor.

Como otro ejemplo estructural, tanto la seda como las telas que tejen las arañas están hechas de fibroma, una proteína con estructura secundaria laminar, en lugar de helicoidal.

Finalmente, la función catalítica que llevan a cabo las enzimas es un ejemplo casi mágico de la importancia de la estructura proteica. Estas proteínas globulares son las responsables de acelerar la multitud de reacciones químicas de un organismo. La manera como lo logran es adoptando un arrollamiento tal que sólo da cabida a que se fije sobre su superficie (y en cierto sitio específico) una determinada molécula, la que debe reaccionar, y no otra (véase la figura 23). Lo que parece como de cuento es que este tipo de moléculas hayan aparecido, y sus medios de acción se hayan perfeccionado a lo largo de los 4 000 millones de años de existencia de condiciones propicias para el surgimiento y evolución de los seres vivos sobre la Tierra.

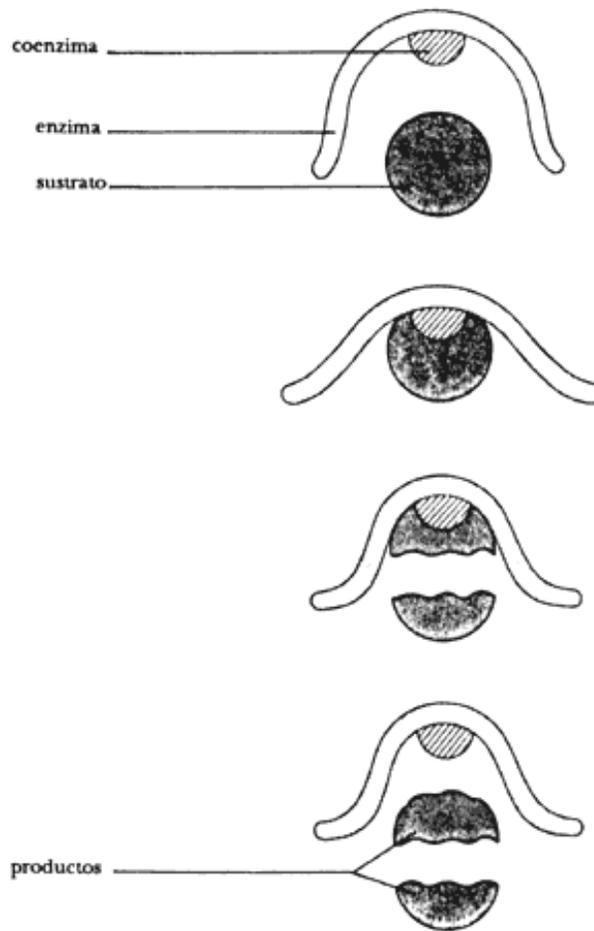


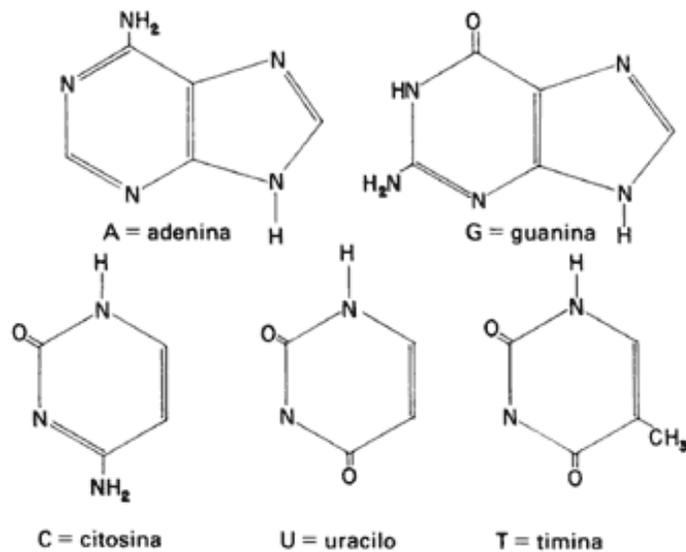
Figura 23. Las enzimas son proteínas que catalizan las reacciones biológicas. Para que sean activas requieren la presencia de una coenzima (como las vitaminas del complejo B). Estas parejas logran llevar a cabo reacciones específicas en los organismos vivos. En la figura se muestra la ruptura de un sustrato cualquiera. Las enzimas se emplean también en multitud de procesos industriales, como la manufactura de alimentos, vino y cerveza, fármacos, detergentes, textiles, cuero y papel.

ÁCIDOS NUCLEICOS O POLINUCLEÓTIDOS

La información genética (color de piel amarillo, pelo negro, ojos cafés, etc.) se encuentra guardada en los genes del núcleo de las células, en una macromolécula llamada ADN (ácido desoxirribonucleico). Esta información es transmitida a las células que fabrican las proteínas a través de otra macromolécula, el ARN (ácido ribonucleico), que es muy semejante al ADN. Estas dos macromoléculas, conocidas como ácidos nucleicos, son las más largas que se han descubierto hasta el momento y tienen masas moleculares superiores a 20 000 millones de uma. Son la parte fundamental de los sistemas de reproducción de todos los seres vivos, desde los virus hasta el *homo sapiens*. Pero ¿cómo están constituidas?

LAS BASES

Tanto en el ADN como en el ARN se encuentran diferentes moléculas cíclicas con varios átomos de nitrógeno. Por sus propiedades básicas son conocidas como *bases púricas* (aquellas derivadas de la purina) y *bases pirimídicas* (derivadas de la pirimidina). La fórmula 69 presenta las cinco bases de los ácidos nucleicos.



Fórmula 69. Fórmulas de las dos bases púricas y de las tres bases pirimídicas que forman parte de los ácidos nucleicos.

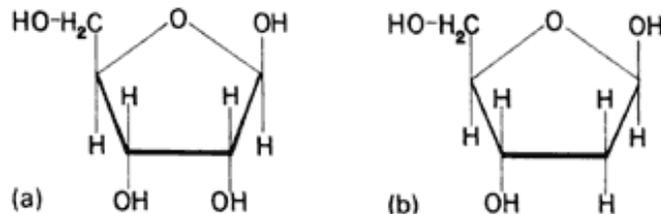
El ADN contiene cuatro de estas moléculas, y difiere del ARN en que la timina reemplaza al uracilo. Así, si damos la siguiente nomenclatura: **A= adenina**, **G= guanina**, **C= citosina**, **U= uracilo**, y **T= timina**, entonces los dos ácidos nucleicos contienen las siguientes bases:

ADN= A, G, C, T.

ARN= A, G, C, U.

LOS NUCLEÓSIDOS

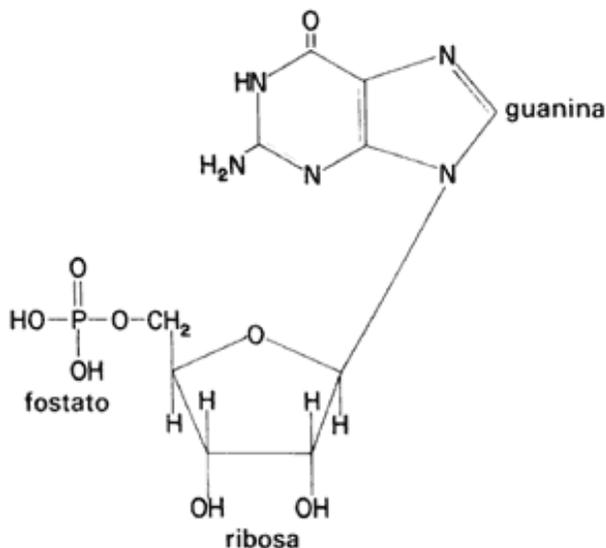
Los nucleósidos consisten en la unión de una base púrica o pirimídica a una molécula de azúcar (sacárido). Los azúcares que se presentan contienen sólo cinco átomos de carbono y no seis, como en el caso de la glucosa y la fructosa. La ribosa (en el ARN) o la desoxirribosa (en el ADN) son los dos azúcares presentes en los ácidos nucleicos (véase la fórmula 70). La única diferencia entre estas dos moléculas es la presencia de un grupo OH adicional en la ribosa. Este simple cambio tiene, sin embargo, un profundo efecto en las funciones biológicas de la macromolécula.



Fórmula 70. La ribosa (a) y la desoxirribosa (b). Cuando estos azúcares se enlazan químicamente a las bases de la fórmula 69, se forman agregados que reciben el nombre de nucleósidos.

LOS NUCLEÓTIDOS

Se llama nucleótido al resultado de la unión de un nucleósido con un grupo fosfato (H_2PO_4). Es decir; están formados por una base (púrica o pirimídica), un azúcar (ribosa o desoxirribosa) y fosfato (véase la fórmula 71).



Fórmula 71. Estructura de un nucleótido con guanina como base y ribosa como azúcar.

ÁCIDOS NUCLEICOS O POLINUCLEÓTIDOS

Un nucleótido se une a otro por una reacción de condensación, formando *polinucleótidos*.

El ADN y el ARN son polinucleótidos en donde los fosfatos actúan como puentes de unión de diferentes nucleótidos. Con ello se forman larguísimas cadenas. La columna vertebral de la cadena está constituida por el grupo fosfato y el azúcar. Las bases pueden considerarse como ramificaciones. Como en el caso de las proteínas, la estructura primaria de estas macromoléculas se encuentra definida por la secuencia de los nucleótidos, la que, a su vez, depende de la base ligada al azúcar (véase la fórmula 72).

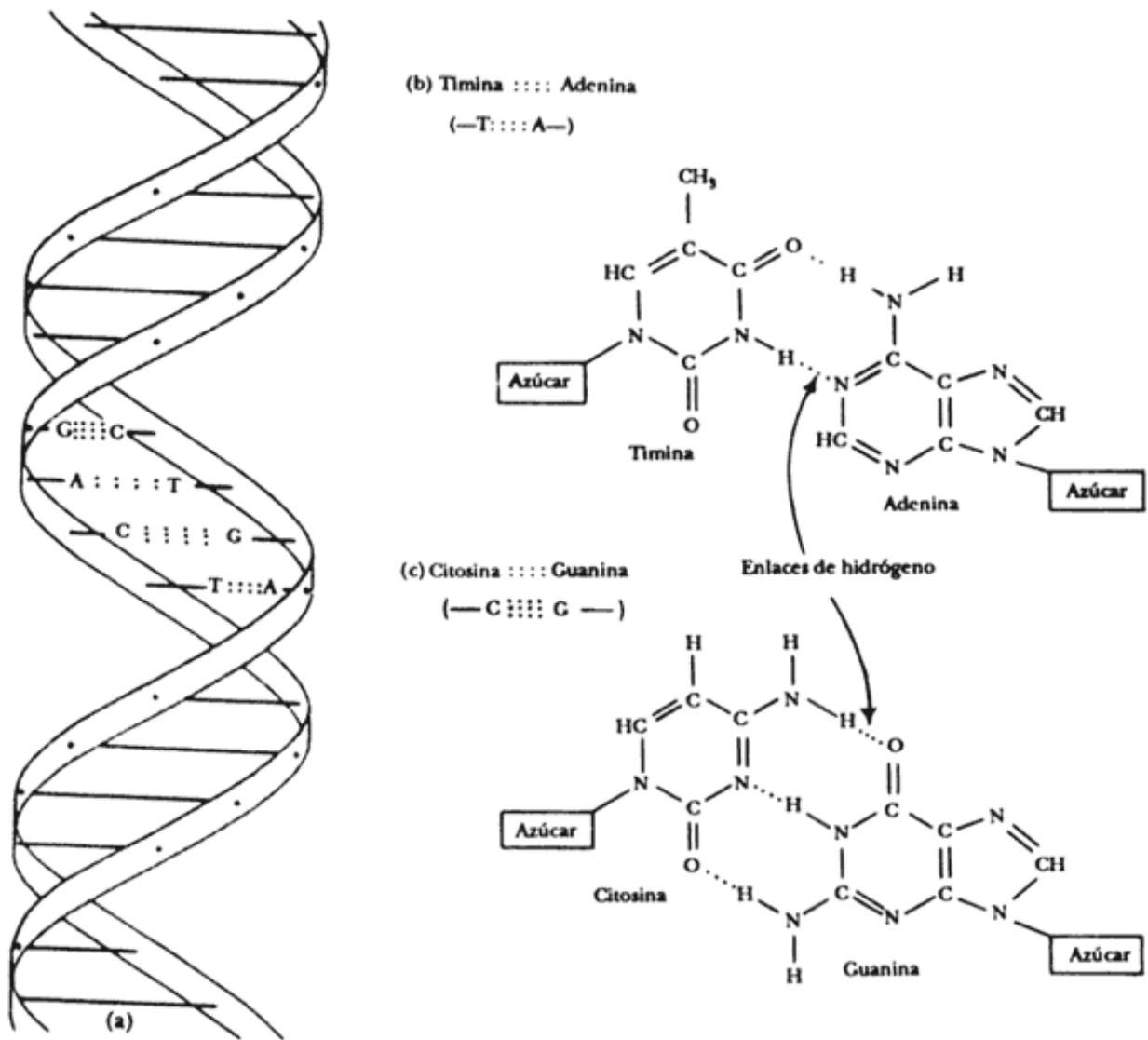
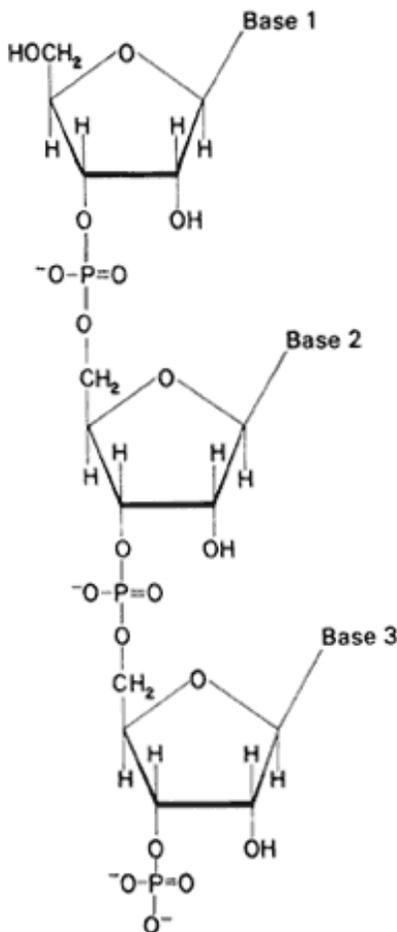


Figura 24. a) La doble hélice del ADN consiste en dos polinucleótidos enlazados a través de puentes de hidrógeno entre bases de cada cadena. b) Una timina de un lado se une con una adenina del otro. c) Una citosina con una guanina.

La ya famosa *doble hélice* corresponde a la estructura secundaria de los polinucleótidos. La forma helicoidal se adquiere gracias a la existencia de enlaces por puente de hidrógeno entre las bases de dos diferentes cadenas. Aquí se encuentra el secreto de la vida (véase la figura 24).



Fórmula 72. Segmento de polinucleótido. El orden en que se arreglan las bases a lo largo de la cadena es la clave de la información hereditaria de un individuo. En estas cadenas radica la química de la herencia.

J. Watson, F. Crick y M. Wilkins ganaron el Premio Nobel en 1962 por la elucidación de la estructura secundaria del ADN.

El orden en que están acomodadas las diferentes bases púricas y pirimídicas a lo largo de la hélice determina el mandato genético para producir, por ejemplo, una hormona humana o una célula sexual de una mosca.

...AL ADN

Fue en 1973 cuando, por primera vez, los bioquímicos lograron separar pedazos de genes de ciertas especies animales e introducirlos en otra especie. Es decir; hoy es perfectamente factible tomar un pedazo de ADN humano (el responsable de producir la insulina, por ejemplo) y *pegarlo* a un plásmido que se introduce a una bacteria. El resultado sorprendente es una colonia bacteriana que produce insulina humana. Con ello puede atenderse la necesidad de los enfermos de diabetes, que no pueden producir esta hormona pancreática.

Esta manipulación bioquímica ha generado una nueva rama de la ciencia, que se conoce como tecnología del ADN recombinante (rADN) o *ingeniería genética*. Y no es que el bioquímico pretenda tomar el lugar del ingeniero, sino que ahora él está en posibilidad de diseñar un nuevo tipo de estructuras: ¡las de los seres vivos!

No queremos terminar este libro sin mencionar y dar reconocimiento a un destacado científico mexicano: Francisco Bolívar Zapata. Fue el primero en describir; en 1977, un procedimiento para unir eficientemente moléculas de ADN y luego estabilizarlas en células bacterianas. Su artículo ha servido de base para más de 6 000 trabajos en la bibliografía mundial, lo cual constituye el récord para un científico latinoamericano. Bolívar estudió la carrera de química y luego la maestría en bioquímica en México. Fundó el Centro de Investigación en Ingeniería Genética y Biotecnología (hoy Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de

México) en Cuernavaca, Morelos. Por sus contribuciones recibió a fines de 1991 el Premio Príncipe de Asturias y en 1992 el Premio Nacional de Ciencias y Artes.

Ha terminado el camino del tequesquite al ADN. La trayectoria tomada puede haber parecido caótica y desarticulada, pero su elección ha pretendido mostrar algunos frutos de la ciencia central.

Esperamos que el lector haya podido apreciar la aportación de la química a algunos aspectos de nuestra sociedad moderna. No le debe caber duda alguna de que la ciencia ha actuado en los últimos 300 años como un enorme elemento transformador de nuestro modo de vida. Si tomamos la debida precaución en los efectos ecológicos de estas transformaciones y las guiamos con un estricto sentido ético, la ciencia nos proporcionará muchos beneficios y muy pocos dolores de cabeza.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Chow, S., *Petroquímica y sociedad*, colección La Ciencia desde México, Fondo de Cultura Económica, México, 1987.

Comisión Petroquímica Mexicana, *Plásticos de ingeniería*, SEMIP, México, 1988.

Eguiluz, "Diagnóstico de la industria de los polímeros en México", en *Memorias del Segundo simposio nacional de polímeros*, Urea, México, 1986.

Jones, M. M., J. T. Netterville, D. O. Johnson, y J. L. Wood, *The World of Chemistry*, caps. 15 y 16, Saunders, Filadelfia, 1992.

Hughes, T., *Chemistry: Ideas to Interpret Your Changing Environment*, caps. 9 y 10, Dickenson, Encino, 1975.

Mark, H. F., *Moléculas gigantes*, Colección Científica, Time Life, México, 1972.

Paladini, A. C. y M. Burachik, *Macromoléculas. Monografías de química*, núm. 3, OEA, Washington, 1968.

Ureta Barrón, E., *Polímeros*, ANUIES, México, 1975.



COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S.A. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D.F.

Se tiraron 5000 ejemplares.

La Ciencia para Todos

es una colección coordinada editorialmente

por *Marco Antonio Pulido*

y *María del Carmen Farías.*



"La química es la ciencia de las transformaciones de la materia", proponen los autores de este libro como definición de la que consideran "ciencia central". En efecto, parece mentira que si tomamos un metal muy activo —el sodio— y un gas tóxico de tono verdoso —el cloro— obtengamos nada menos que la sal común de mesa con que condimentamos nuestros alimentos. Esta aparente "magia" del cambio químico ha fascinado al hombre desde sus primeros tiempos, y aún nos atrae, como a los primitivos, la visión del fuego, visión inexplicable, que transforma definitivamente los objetos que toca.

Pese a que el hombre a lo largo del tiempo aprendió en forma pragmática numerosos principios de la química, e incluso inventó una pseudociencia paralela, la alquimia, apenas han pasado unos doscientos años desde que la química cuenta con una base sólida y un método científico propios. Mas en este corto tiempo, la química ha servido al hombre para crear nuevos materiales y, sobre todo, para interpretar una multitud de fenómenos que nos rodean, entre ellos el origen mismo de la vida.

En tiempos de cambios vertiginosos, los autores consideran perentorio presentar una imagen útil, cotidiana y, especialmente, accesible, de la química, en la estimación de que es "indispensable modificar radicalmente los esquemas prevalecientes de la difusión y enseñanza de las ciencias" en la esperanza, acorde con los principios de esta colección, de animar al lector a que profundice en sus lecturas sobre la materia y vencer, en los estudiantes, la fobia existente contra el aprendizaje de las ciencias.

Se inicia así el largo camino del tequesquite, la sal alcalina utilizada como condimento por los antiguos mexicanos al ADN, la estructura helicoidal que encierra el "secreto de la vida", ambas sustancias químicas: una sal y un polinucleótido.

Andoni Garritz y José Antonio Chamizo son profesores de tiempo completo del posgrado de la Facultad de Química de la UNAM, donde hicieron su licenciatura y maestría. Garritz se doctoró en esta facultad y Chamizo en la de Sussex, Inglaterra. Ambos son miembros del Sistema Nacional de Investigadores. Preocupados por la enseñanza de la química, han insistido en la necesidad de corregir la metodología didáctica de la ciencia en los niveles básicos. En esa concordancia, este libro ofrece un enfoque atractivo y pedagógico de varios lemas de la química, hecho de manera que justifique para esta disciplina el calificativo de "ciencia central".

