

## Química

### Plásticos sin petróleo<sup>1</sup>

Los materiales plásticos forman parte del modo de vida actual, están en todos los usos y actividades, en los hospitales, los deportes, los juguetes, el vestido, la decoración, los cultivos, la construcción, los automóviles, barcos y aviones, los teléfonos, los computadores, ..., en fin, en todo, y la tendencia es hacia un aumento creciente en su uso. Los plásticos actuales se obtienen a partir de materias primas cuyas fuentes naturales son el petróleo, el gas y el carbón, siendo la principal de ellas el petróleo. Éste es un recurso natural no renovable, por lo que su consumo conducirá a un agotamiento irreversible en un plazo que las previsiones estiman no muy lejano. Esta sola amenaza ya sería suficiente para buscar fuentes alternativas, pero la situación viene agravándose por el encarecimiento del petróleo y la dependencia del suministro desde zonas en conflicto. Por eso, es cada vez más importante poder obtener plásticos sin usar el petróleo como fuente ("plásticos sin petróleo").

La búsqueda de fuentes alternativas ha de dirigirse hacia recursos que sean accesibles en todas las zonas y, sobre todo, que se repongan cíclicamente en la Naturaleza, es decir, han de ser fuentes renovables. Las fuentes renovables más accesibles son las que se pueden obtener de seres vivos: microorganismos, plantas y animales. En realidad, las materias primas procedentes de animales y plantas son las que el hombre ha utilizado para la elaboración de materiales plásticos hasta que los plásticos sintéticos de hoy se hicieron dominantes. La celulosa y el almidón, las resinas y aceites secantes vegetales, la cola animal, el cuero y lana, el caucho natural, eran todas materias primas para lo que hoy llamaríamos materiales plásticos. Si éstos eran recursos renovables ¿por qué fueron sustituidos por los plásticos actuales? Por múltiples razones. Los productos vegetales y animales tienen variaciones según el lugar de origen y el año en que se producen; son como el vino, que depende de la ubicación de la viña y el año de la cosecha. No se prestan, por tanto, a una producción continua y de calidad uniforme. Además, requieren más pasos de selección, purificación, etc., que dificultan o encarecen el proceso. Tampoco se prestan a que la producción sea masiva, pues las materias vegetales y animales están sometidas a ciclos de producción largos y requieren grandes extensiones (Figura 1). Por eso, la producción industrial de los plásticos sintéticos, que es perfectamente normalizable y se presta a grandes escalas, ha llegado a dominar totalmente. Además, en los plásticos sintéticos el ingenio químico puede desarrollar nuevos materiales, mediante cambios adecuados en la estructura de los componentes

que reaccionan, mientras en los naturales esa estructura viene dada y solo se puede modificar mediante transformación posterior, que, en general, ofrece menos posibilidades y es más costosa.

Veremos, a lo largo de esta exposición, que los "plásticos sin petróleo" no son alcanzables actualmente y que, por tanto, para ser rigurosos el título debería haber sido otro, quizás el más modesto de "plásticos con menos petróleo".

Tampoco el título es riguroso en la palabra plástico. El problema planteado por los plásticos en relación con su dependencia del petróleo afecta por igual a todos los materiales polímeros, de los cuales los plásticos no son sino una familia. Otras familias son los cauchos, las fibras, las resinas, los adhesivos, pinturas y recubrimientos de superficies, etc. Todos ellos están compuestos por sustancias macromoleculares o polímeros y en su síntesis se hace uso del petróleo. Pero, el lenguaje popular ha adoptado preferentemente el término plástico, y dado que el asunto del que aquí se trata es una preocupación, no sólo en los laboratorios e industrias, sino, también, en la opinión pública, me ha parecido mejor usar el vulgar "plástico". Por otra parte, la ligereza en la elección del vocablo plástico no es tanta, ya que los polímeros que tienen mayor producción y consumo son los del tipo llamado termoplástico, del que son ejemplos los polietilenos, polipropilenos, poliestirenos, policloruro de vinilo, etc.

Los plásticos han venido teniendo mala prensa, en parte con razón y en parte por ignorancia. Sólo una de cada 25 partes del petróleo que se consume va para la síntesis de plásticos, las otras 24 partes se queman como fuente de energía. No sólo es una fracción muy pequeña la que se usa para plásticos, sino que esta fracción de petróleo convertido en plástico todavía conserva gran parte de su valor energético. 24 partes del petróleo se queman sin más usos y 1 parte dedicada a plásticos pasa por un uso útil del material antes de ser destruido. Sin embargo, en la opinión pública, los plásticos son los culpables.

A esta aversión contribuye en gran manera la proliferación de los desechos plásticos. Lo que convierte a la basura de plásticos en un problema es su longevidad, cualidad ésta deseada y apreciada en los plásticos durante su vida útil, pero que les hace un estorbo cuando ya se han hecho inútiles. Por eso, una línea de investigación muy activa ha sido la de lograr polímeros que sean degradables por la acción de la luz, del oxígeno, del agua y de los microorganismos en el suelo. Los polímeros obtenidos a partir de fuentes renovables, que vamos a ver, entran dentro de la categoría de biodegradables y son, por lo tanto, "limpios" en su origen, al no derivar

<sup>1</sup> Lección impartida en el acto académico de celebración de San Alberto Magno, patrón de la Facultad de Ciencias, el 14 de noviembre de 2005.



Figura 1. Latex del árbol del caucho (*Hevea brasiliensis*).

del petróleo, y “limpios” en su final, al ser fácilmente degradables en la naturaleza.

La investigación y el desarrollo industrial de plásticos a partir de fuentes renovables llevan ya algunas décadas de trabajo activo, pero el éxito, de momento, es muy reducido. Las investigaciones comienzan a abundar en los años 1970-1980, y las primeras comercializaciones surgen en los años 1980-1990, pero no pueden considerarse medianamente desarrolladas hasta los años 2000, y aún hoy, en el 2005, no han alcanzado una posición consolidada. Esta frustración se debe, sobre todo, a razones técnicas y económicas, pues los actuales polímeros obtenidos a partir de fuentes renovables todavía no alcanzan las mismas prestaciones y son más caros que los obtenidos a partir del petróleo, pero también influye, una cierta desconfianza o falta de aceptación de este tipo de polímeros no convencionales.

Dos son las familias de polímeros obtenidos a partir de fuentes renovables que están desarrollados hasta el nivel comercial en el momento actual: las polilactidas y los polihidroxitiratos (Figura 2).

El conocimiento de estos polímeros es bastante antiguo, así las polilactidas fueron preparadas por Carothers en los laboratorios de la compañía Dupont ya en

1932, y los polihidroxitiratos fueron aislados de ciertas bacterias por el microbiólogo LeMoigne en el instituto Pasteur en 1923. Sin embargo, pasó cerca de medio siglo antes de que se lograra obtenerlos con propiedades útiles para su aplicación como materiales. Así, el primer proyecto industrial de polihidroxitiratos fue anunciado en 1982 por la compañía Imperial Chemical Industries. Sin embargo, la producción y comercialización, tanto de polihidroxitiratos como de polilactidas, ha sufrido, a partir de esa fecha, diversos vaivenes, con proyectos que no llegaron a cuajar y una cadena de transferencias de patentes y tecnología de una empresa a otra, ante la imposibilidad de cumplir con las expectativas programadas, debido a la falta de una verdadera implantación de estos productos, hasta el punto de que todavía hoy, es una producción minoritaria y su futuro no está garantizado.

Los polihidroxitiratos pertenecen a un grupo más amplio, el de los polihidroxiálcanos, pero el miembro más importante es el butirato (Figura 3). La terminología correcta del polímero es poli(3-hidroxitirato) o poli( $\beta$ -hidroxitirato). Butirato porque es un éster del ácido butírico, y 3-, o  $\beta$ -hidroxi, porque el ácido butírico tiene un hidroxilo en el carbono 3, contando el carbono del carboxilo como 1. En una molécula de hidroxitirato hay dos grupos reaccionables, alcohol y ácido carboxílico, con lo que la molécula es bifuncional, puede unirse o encadenarse a otras dos moléculas de hidroxitirato, del mismo modo que cada eslabón de una cadena está unido a sus dos eslabones anterior y posterior. En cada una de estas uniones se forma un grupo éster, de modo que la cadena es un poliéster.

Para saber si este polímero tiene cualidades como plástico, se comparan sus propiedades con las de un polímero típico del petróleo. Esta comparación es importante para saber si podrá sustituir a los polímeros del petróleo en sus aplicaciones, y también para saber si se va a poder procesar por los métodos ya existentes de moldeado, termoconformado, extrusión, inyección, etc., sin requerir una renovación de la maquinaria. El polímero del petróleo idóneo para esta comparación es el polipropileno. Es de los de mayor volumen de producción y de aplicaciones más diversas. El polihidroxitirato tie-

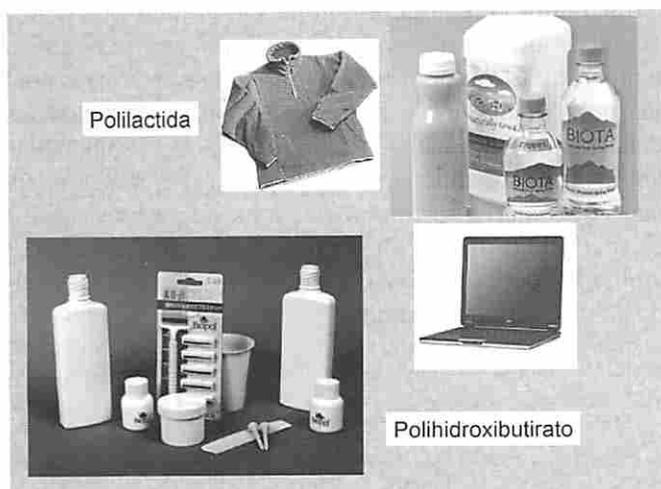


Figura 2. Dos familias de polímeros: las polilactidas y los polihidroxitiratos.

ne con el polipropileno también similitudes en su estructura molecular. Ambos polímeros tienen igual configuración estereoquímica en sus cadenas: los dos son isotácticos. Esto quiere decir que, en el carbono de cada eslabón que tiene dos sustituyentes desiguales (hidrógeno y metilo), la orientación de esos sustituyentes en el espacio es la misma en todos los eslabones de la cadena.

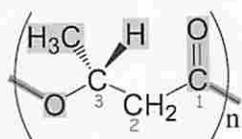


Figura 3. Polihidroxitirato.

Para pesos moleculares similares, el polihidroxitirato y el polipropileno son muy parecidos en grado de cristalinidad, temperaturas de fusión y vítrea, módulo y resistencia, pero difieren en la elongación de rotura (ver Tabla 1). El polihidroxitirato tiene, así, propiedades térmicas y mecánicas similares al polipropileno, excepto que es más rígido y quebradizo, le falta la plasticidad del polipropileno. El elevado grado cristalino de ambos polímeros se alcanza, en el caso del polihidroxitirato, mediante una cristalización lenta, por lo que se forman esferulitas de gran tamaño que hacen poco dúctil al material (Figura 4). También la elevada temperatura de fusión repercute negativamente sobre sus propiedades mecánicas, porque el moldeado o la extrusión del fundido a esas altas temperaturas produce degradación del polihidroxitirato por rotura de sus grupos ester en la cadena macromolecular, riesgo que no tiene el polipropileno.

Si la cadena, en lugar de tener una rama lateral muy corta, con un solo carbono del grupo metilo, tuviera esa rama lateral más larga, con varios carbonos, la regularidad cristalina sería menor, el empaquetamiento de cadenas en el sólido sería más imperfecto, con lo cual la fusión se produciría a temperaturas no tan altas.

En la serie de los 3-hidroxiácidos, el miembro siguiente al butírico es el valérico, que se diferencia por contener un carbono más. La cadena de poliéster, en el caso del 3-hidroxi valerato, tiene, en la rama lateral, dos carbonos del grupo etilo, es decir un carbono más que el poliéster de 3-hidroxitirato (Figura 5). Los polímeros comerciales de polihidroxitirato suelen ser en realidad copolímeros de hidroxitirato con hidroxi valerato, y la contribución de estas ramas algo más largas, mejora sus propiedades como plástico (Figura 6). El copolímero sigue siendo mayoritariamente hidroxitirato, con una pequeña proporción del comonomero hidroxi valerato, proporción que varía según las propiedades que se deseen. Con esta pequeña presencia del comonomero con rama lateral de dos carbonos, se consigue un material polímero algo menos cristalino y que no funde tan alto. Con ello se logra, por una parte, menos degradación durante el procesado, y, por otra, una mejor plasticidad, al haber una mayor fracción del material en estado amorfo que actúa de matriz plástica entre los cristales.

Tabla 1. Comparación de las propiedades físicas entre poli(3-hidroxitirato) y polipropileno

Propiedad	Poli(3-hidroxitirato)	Polipropileno
Peso molecular	$5 \times 10^5$	$2 \times 10^5$
Temperatura de fusión	175°C	176°C
Grado cristalino (*)	80%	70%
Temperatura vítrea	4°C	-10°C
Densidad	1,25 g/cm <sup>3</sup>	0,905 g/cm <sup>3</sup>
Módulo de Young	4,0 GPa	1,7 GPa
Resistencia tensil	40 MPa	38 MPa
Elongación de rotura	6%	400%

espiral 2<sub>1</sub>

espiral 3<sub>1</sub>

(\*) Conformación cristalina de la cadena macromolecular.

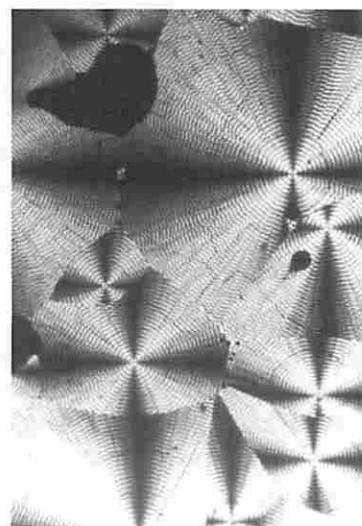


Figura 4. Esferulitas de polihidroxitirato.

Si la rama lateral es aún más larga, el polímero se hace más blando. El efecto es debido a que, cuando la rama lateral es una cadena de varios carbonos, se favorece la movilidad molecular y, con ello, se rebaja la temperatura vítrea del polímero. Para ramas que tienen de seis a doce carbonos, la transición vítrea ocurre a temperaturas muy por debajo del ambiente, con lo cual los polímeros son elastómeros, tienen las propiedades elásticas de un caucho. Pero, como a esa temperatura ambiente aún mantienen un cierto grado de cristalinidad, son elastómeros termoplásticos, es decir, son sólidos elásticos de forma definida mientras están a temperatura ambiente, pero al calentar funden y pueden ser moldeados a otra forma diferente.

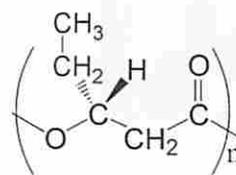


Figura 5. Hidroxi valerato.

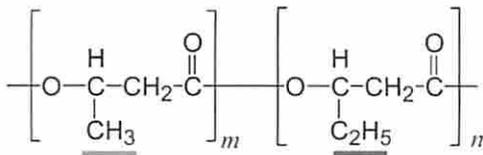


Figura 6. Poli(hidroxibutirato-co-hidroivalerato).

¿Cuál es la materia prima para obtener estos polihidroalcanoatos, y en qué tipo de reactor industrial se producen? Los polihidroalcanoatos son sintetizados por determinadas bacterias, que se alimentan o consumen azúcares de tipo exosa. En determinadas condiciones de carencia de algún nutriente esencial, notablemente cuando hay déficit de nitrógeno o de fósforo en el medio en el que crecen, las bacterias producen y almacenan en su interior estos poliésteres en forma de gránulos (Figura 7). Estos gránulos son material de reserva energética, pues, en caso de necesidad, la bacteria los revierte a grupos acetilo, por hidrólisis del grupo ester.

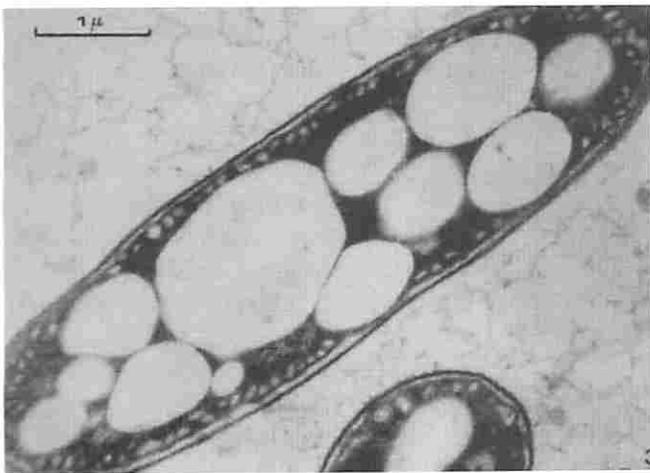


Figura 7. Micrografía por transmisión del corte ultrafino de una célula de *Azotobacter chroococcum* tratada con ácido fenil acético. De Nuti, M.P.; de Bertoldi, M.; Lepidi, A.A. *Can. J. Microbiol.* 1972, 18, 1257.

Los polihidroalcanoatos son, por tanto, el resultado de una biosíntesis por microorganismos. El proceso se lleva a cabo en reactores de fermentación, como si de la fabricación de vino se tratase. A diferencia del vino, el poliéster hay que extraerlo y aislarlo del caldo bacteriano, proceso que no es muy económico. A cambio, la materia prima para alimentar a las bacterias es barata. Cualquier producto de cultivo agrícola que contenga abundantes azúcares puede, en principio, servir como caldo de cultivo de las bacterias, naturalmente controlando adecuadamente los parámetros fisicoquímicos del proceso.

Los polihidroalcanoatos son así polímeros naturales, como puedan serlo la celulosa o la quitina, pero, mientras la presencia de celulosa o quitina en la naturaleza aparece muy a la vista, en los copos del algodón o en el caparazón de los crustáceos, los polihidroalcanoatos están escondidos dentro de los microorganismos. Es una limitación seria que se produzcan en ese medio bacte-

riano, por ello la investigación apunta hacia otros medios de obtención. Una de las vías está siendo transferir los genes que codifican las enzimas que controlan la biosíntesis de los polihidroalcanoatos desde las bacterias a plantas herbáceas, con lo cual bastaría sembrar y cosechar esas plantas para obtener el polímero. Así, se han logrado gránulos de polihidroalcanoato en las células de alguna planta transgénica y puede que en un futuro sea una vía comercial de obtención de estos polímeros (Figura 8). Otra vía está siendo la obtención del polihidroalcanoato in vitro, es decir por reacción química sin intervención de las bacterias. Para ello se ha aislado la enzima responsable de la síntesis bacteriana y se ha logrado que conserve su actividad fuera del medio biológico. Con dicha enzima aislada se ha logrado sintetizar polihidroalcanoatos en un reactor químico, pero ya nos podemos dar cuenta de lo delicado de la operación y la dificultad para trasladarla a gran escala.

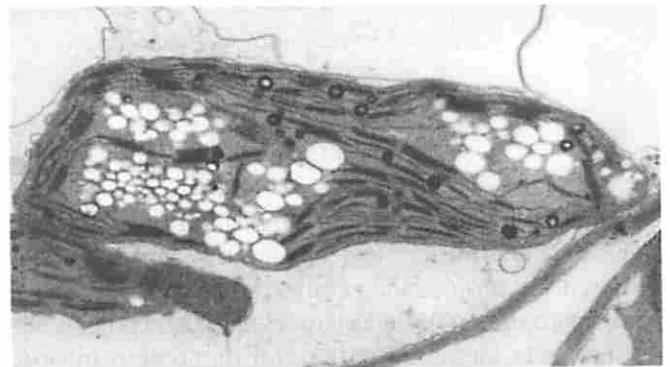


Figura 8. Gránulos de PHB en el cloroplasto de *Arabidopsis thaliana*.

La otra familia de polímeros a partir de fuentes renovables son las polilactidas. Estos polímeros sí son el resultado de una polimerización química, a diferencia de los polihidroalcanoatos que salen de una fermentación microbológica. En las polilactidas hay un monómero que se polimeriza mediante un catalizador adecuado.

El monómero base para esta polimerización es el ácido láctico o 2-hidroxiopropiónico. Es un hidroxiaácido, como los que hemos descrito a propósito de los polihidroalcanoatos, pero ahora el grupo hidroxilo está en el carbono contiguo al carboxilo, por lo que es un 2-hidroxio- $\alpha$ -hidroxiaácido. El carbono intermedio o carbono 2 tiene dos sustituyentes desiguales (hidrógeno y metilo), lo mismo que ocurría en uno de los dos carbonos de cada eslabón del polihidroxibutirato. Ese carbono con dos sustituyentes desiguales es un centro quiral o carbono asimétrico, por lo que, del ácido láctico, hay dos isómeros ópticos, L y D. Según el monómero de partida y las condiciones de polimerización, se pueden obtener polímeros ópticamente puros, L o D, o polímeros racémicos, mezcla de estas dos configuraciones.

Estos polímeros proceden de fuentes renovables porque su monómero, el ácido láctico, se obtiene por fermentación de azúcares del almidón y las melazas, cu-

yas materias primas son productos agrícolas, tales como el maíz y otros cereales, la caña de azúcar, la remolacha, etc.

Si, en la molécula de hidroxiaácido, consideramos el carboxilo del ácido como cabeza y el hidroxilo como cola, las moléculas de monómero se pueden encadenar por unión cabeza-cola, para dar una cadena macromolecular (Figura 9). Cada unión es una condensación con eliminación de agua, de la que resulta un grupo éster. El polímero es un poliéster llamado poli(ácido láctico).

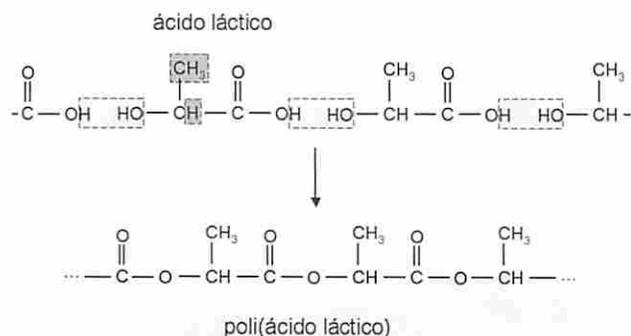


Figura 9.

Esta policondensación es una reacción reversible, en la que se suelen formar cadenas no muy largas, que no confieren las propiedades convenientes para un material plástico. Las polimerizaciones que dan cadenas suficientemente largas no parten del monómero mismo, sino de un dímero cíclico formado a partir de él. El ácido láctico se dimeriza, por condensación de dos moléculas, cabeza de 1 con cola de 2, cabeza de 2 con cola de 1, lo cual da una molécula cíclica o anillo, llamado lactida (Figura 10). Esta lactida es la que se somete a una polimerización por apertura de anillo, para dar cadenas suficientemente largas, adecuadas para los materiales plásticos. Los polímeros son, entonces, polilactidas, por obtenerse en la polimerización de la lactida.

Las propiedades térmicas y mecánicas de las polilactidas como materiales son similares a las de los polihidroxibutiratos. Así, tienen una cristalinidad elevada, con temperaturas de fusión de unos 180°C, y vítrea de unos 60°C. Sólo los polímeros con muy alta pureza en uno de los dos isómeros ópticos son cristalizables, los demás son predominantemente amorfos. Tienen buena resistencia mecánica, pero poca plasticidad. Para mejorar esta propiedad, o modificar la gama de sus aplicaciones, se suelen mezclar con otros polímeros u oligómeros, como polietilén glicol, que actúan como plastificantes. También se preparan copolímeros de ácido láctico con otros monómeros. Los comonómeros más utilizados son el ácido glicólico, o 2-hidroxietanoico, y la ε-caprolactona. Todos estos monómeros tienen estructuras moleculares afines, y sus polímeros podemos sistematizarlos dentro de un grupo general (Figura 11). En este grupo también entrarían los hidroxialcanoatos que hemos visto antes.

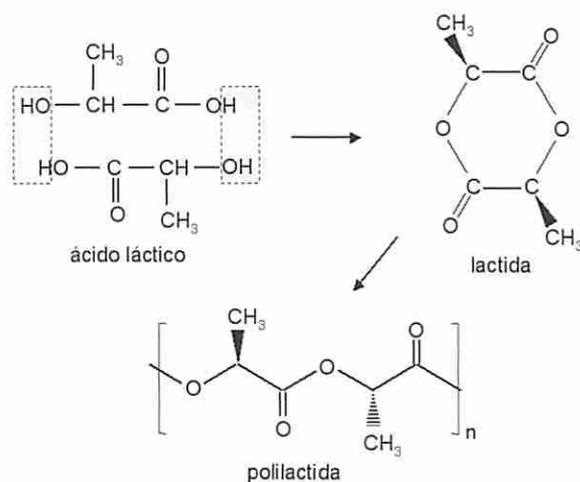


Figura 10.

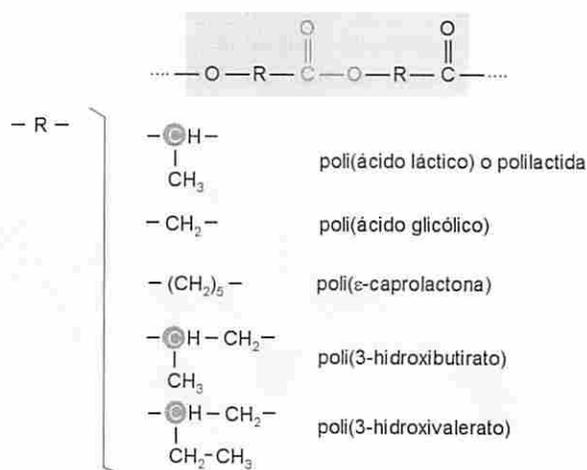


Figura 11.

Lo mismo que los polihidroxialcanoatos, las polilactidas pueden sufrir degradación al fundirlas para su procesado. El riesgo es muy grave si el polímero no está suficientemente seco, porque, como ya quedó dicho, la formación de uniones éster es reversible y, en presencia agua, sufren hidrólisis, sobre todo a las altas temperaturas propias del procesado. Para evitar esta degradación es necesario secar la polilactida muy exhaustivamente y mantenerla seca durante el almacenamiento y transporte, lo cual requiere precauciones muy cuidadosas, pues el material es higroscópico y absorbe la humedad ambiente. Todo esto, naturalmente, es un costo añadido en su elaboración.

## CONCLUSIÓN

Como conclusión de todo lo que venimos considerando, podemos decir que hoy no hay una alternativa real que permita reemplazar a los polímeros del petróleo. Son muchas las vías abiertas en esta dirección, pero cada una con sus limitaciones y, en general, quedan todavía avances pendientes para que los plásticos sin petróleo compitan de verdad en propiedades y costo con los del petróleo. Lo que no cabe duda es que existe la in-

tención y el esfuerzo por lograrlo, tanto en la investigación científica como en el desarrollo tecnológico. Pero hay otros problemas que no radican en que los materiales procedan o no del petróleo. Incluso cuando la alternativa de usar fuentes renovables como materia prima para los plásticos llegara a ser realidad, todavía necesitaríamos petróleo como energía, para procesar esos materiales y trasportarlos. La energía aparece pues como el problema de mayor envergadura.

## BIBLIOGRAFÍA

1. A. Horta: "Macromoléculas", UNED, Madrid, 1982 y 1991.

2. R.V. Lenz y R.H. Marchessault, *Biomacromolecules*, **6**, 1 (2005).
3. A. Södergard y M. Stolt, *Prog. Polym. Sci.* **27**, 1123 (2002).
4. K. Sudesh, H. Abe y Y. Doi, *Prog. Polym. Sci.* **25**, 1503 (2000).
5. C. Sánchez Renamayor y M.J. Molina Lorenzo (coordinadoras), "Plásticos aplicados en Medicina", UNED, Madrid, 2003.
6. S.H. Imam, R.V. Greene y B.R. Zaidi (coordinadores), "Biopolymers", Am. Chem. Soc., Washington, USA, 1999.
7. J. Fraschini, R. Plesu, J.R. Sarasúa & R.E. Prud'homme, *J. Polym. Sci. B: Polym. Phys.* **43**, 3308 (2005).

Arturo Horta Zubiaga

Dpto. de Ciencias y Técnicas Fisicoquímicas

## NOVEDADES CIENTÍFICAS

### Novedades Científicas en Ciencias Ambientales

#### DISMINUCIÓN DEL pH DE LA SUPERFICIE OCEÁNICA

El pH de la superficie oceánica podría haber disminuido en 0,1 unidades, lo que equivale a un incremento del 30% en la concentración de iones hidronio en el agua.

C. Pelejero y E. Calvo, investigadores del Instituto de Ciencias del Mar (CSIC) de Barcelona, han mostrado por primera vez, en colaboración con la Universidad de Australia, cómo ha evolucionado la acidez del agua de los océanos en los últimos 300 años. En su estudio, (*Science*, 2005, **309**, 2204-2207), se describen variaciones importantes del pH, de 0,3 unidades, en ciclos de 50 años, lo que permite evaluar la variabilidad natural del pH de las aguas. Hasta el presente no se disponía de medidas instrumentales para analizar esta acidificación en un periodo tan extenso.

Las determinaciones del pH marino se han realizado mediante el análisis de muestras de un coral de la especie *Porites*, de 300 años de antigüedad, procedente del arrecife de Flinders, a 250 kilómetros de la costa noreste de Australia. La reconstrucción de pH, que incluye la era preindustrial y la moderna, pone de

manifiesto un problema medioambiental relativamente nuevo, la progresiva acidificación de los océanos.



Figura 1. Coral *Porites*.

#### "SECUESTRO" DE DIÓXIDO DE CARBONO CO<sub>2</sub>

Ante las dificultades para reducir a la atmósfera las emisiones de CO<sub>2</sub>, principal gas de efecto invernadero, se están considerando otras alternativas como su captura y liberación en forma líquida en simas marinas o bien, inyectarlo en el subsuelo de los océanos. En este caso el CO<sub>2</sub> se tiene que licuar e inyectar en forma de gotas a grandes profundidades por debajo del lecho marino, aunque estos procedimientos presentan riesgos ya que el CO<sub>2</sub> podría libe-

rarse a la atmósfera, incluso en forma de erupciones violentas provocando graves accidentes.

Y. Zhang, de la Universidad de Michigan, ha desarrollado modelos teóricos para determinar la viabilidad de esta idea (*Environ. Sci. Technol.*, 2005, **39**, 7719-7724). Sus resultados indican que la inyección de CO<sub>2</sub> líquido debe realizarse a una profundidad de al menos 800 metros bajo condiciones especiales y hasta 3000 metros si se quiere asegurar que el gas no va a escapar. Una posible solución para inyectarlo a profundidades moderadas sería formar gotas de CO<sub>2</sub> muy pequeñas que se disolverían en el océano sin producir explosiones violentas en caso de que se liberase.

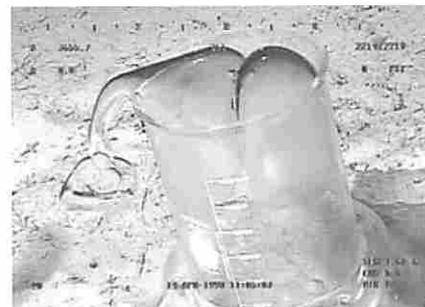


Figura 2. Experimentos con CO<sub>2</sub> líquido en el fondo del océano.

A pesar de que existen dudas, a nivel científico y técnico, sobre la viabilidad del secuestro de CO<sub>2</sub> por