

La química en la mitigación del cambio climático. Reducción de la generación de dióxido de carbono

Ramón Mestres Quadreny

Resumen: La mitigación del calentamiento climático supone el control del CO₂ atmosférico. La generación de CO₂ es debida principalmente a la producción de energía a partir de combustibles fósiles y puede ser reducida mediante la disminución del consumo de energía, una mayor eficiencia en el uso de los carburantes fósiles y el uso de fuentes renovables de energía. La Química tiene mucho que aportar en cada una de estas estrategias, especialmente en el desarrollo de las energías renovables.

Palabras clave: Cambio climático, dióxido de carbono, energías renovables, biomasa, biocombustibles.

Abstract: Mitigation of climate warming depends on the control of CO₂ in the atmosphere. Generation of CO₂ is mainly due to the production of energy from fossil fuels and can be minimized by reduction of energy consumption, higher efficiency in the use of fossil fuels and by shifting to renewable energy sources. Chemistry can contribute significantly to these strategies, especially for the development of renewable sources.

Keywords: Climate change, carbon dioxide, renewable energies, biomass, biofuels.

Introducción

La aplicación del método científico deja escaso margen para la duda acerca de la aportación humana al calentamiento del sistema climático global experimentado en los últimos sesenta años. Lo que en la física y la química sirve para demostrar la validez de una hipótesis o teoría, es decir, la obtención del resultado esperado en unas experiencias en condiciones bien determinadas, se ha cumplido también ahora. En efecto, la omisión de las aportaciones debidas a la actividad humana en los modelos matemáticos desarrollados para la comprensión y predicción del clima, lleva a una notable desviación de los valores de las temperaturas experimentales obtenidas a lo largo del siglo pasado.^[1] Existe un paralelismo entre el descubrimiento de los efectos negativos de la actividad humana sobre el medio ambiente y la preocupación actual por el calentamiento climático. *De igual manera que la preocupación ambiental está llevando a la reorientación de actividades, a la toma de medidas correctoras y abre nuevas líneas de investigación y tecnología, también el temor a unos efectos nocivos presenta ahora nuevos retos y está abriendo nuevos horizontes para la ciencia y la tecnología, en particular, para la química.*

Los diversos fenómenos que son considerados como manifestación del cambio climático: incremento del nivel del mar, reducción de la superficie nevada, sequías en el Sahel, lluvias torrenciales en el norte de Europa, frecuencia de huracanes en el Caribe, son atribuibles a una elevación global de la temperatura, que tiene su origen a su vez en un desplazamiento del balance energético que se establece entre la superficie terrestre, la troposfera y el espacio exterior, bajo la acción de la radiación solar. De manera muy simplificada, una parte de la radiación solar que llega a la troposfera es reflejada por las

nubes y por los aerosoles. La radiación que incide sobre la superficie terrestre provoca su calefacción, aunque una fracción es reflejada sin provocar calentamiento (el albedo). A su vez la superficie terrestre emite radiación infrarroja al espacio, una porción de la cual es absorbida por gases atmosféricos como el agua, el dióxido de carbono, o el metano, según el conocido efecto invernadero.^[2]

El desplazamiento del balance energético que provoca el calentamiento climático reciente podría ser atribuido, de acuerdo con la anterior visión, a modificaciones en la radiación solar, a los aerosoles (directamente y como núcleos de formación de nubes), al albedo, o a los gases invernadero. Cuando las magnitudes de las modificaciones de estos factores en los últimos años son expresadas en forma de refuerzo radiante,^[3] de todos ellos destaca el relacionado con los gases invernadero (Figura 1).^[1,4-6] La mitigación del cambio ha de buscarse en consecuencia en los factores que afectan al balance energético: la radiación solar, los aerosoles, el albedo, o los gases invernadero. *De entrada puede adelantarse que la mitigación del calentamiento climático no tiene una solución única. Debe ser acometida mediante la aplicación de múltiples medidas: muchas y modestas.* Algunas de ellas suponen una contribución importante de la química y a ellas se va a dedicar atención.^[7]

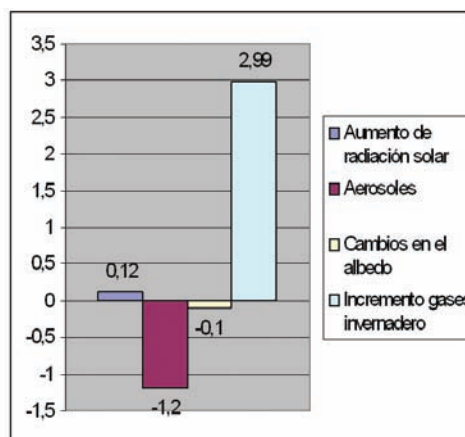


Figura 1. Refuerzo radiante (W/m²) de la radiación solar y de las contribuciones humanas.

Se ha propuesto la mitigación de la radiación solar por reducción de su incidencia en el planeta mediante un parasol en órbita,^[8] o por dispersión por las gotículas de ácido sulfúrico



R. Mestres

Red Española de Química Sostenible. Universidad de Valencia
Álvarez de Castro, 63 - 08100-Mollet del Vallés, Barcelona
C-e: ramon.mestres@uv.es

Recibido: 10/09/2007. Aceptado: 19/11/2007.

La química en la mitigación del cambio climático. Reducción de la generación de CO₂

co que resultarían del lanzamiento de azufre a la estratosfera, como ha sugerido P. J. Crutzen.^[9] Un incremento de aerosoles en la troposfera podría causar un enfriamiento, pero también serios problemas de salud. Las nubes, como efecto en parte de los aerosoles, son una de las incógnitas en la predicción de los efectos del calentamiento climático y también en su mitigación.^[11] Por lo que se refiere al albedo, un efecto refrigerante significativo exigiría la modificación de superficies enormes, como por ejemplo, la conversión de todos los bosques del hemisferio norte en prados, con consecuencias ambientales extraordinarias.^[10]

Donde existe una mayor posibilidad de cambios en la práctica actual y en el desarrollo de nuevas tecnologías, es en el control de los gases invernadero. Suelen considerarse cuatro gases invernadero con tiempo prolongado de residencia en la atmósfera: dióxido de carbono, metano, monóxido de dinitrógeno (N₂O, óxido nitroso) y el conjunto de los compuestos halocarbonados industriales (Figura 2). A ellos hay que añadir el ozono troposférico, que se forma como resultado de la contaminación atmosférica, con un tiempo de residencia menor.^[7,11]

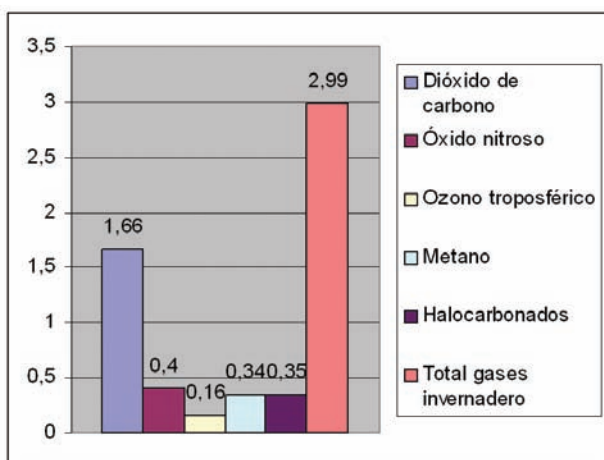


Figura 2. Refuerzo radiante (W/m²) de los gases invernadero de origen humano.

La mayor contribución humana al efecto invernadero está asociada a las emisiones de dióxido de carbono. La concentración de este gas en la atmósfera es el resultado de un equilibrio de emisión y absorción dentro del ciclo natural del carbono, que mueve unas 700 Gt de CO₂ al año. A esta cantidad se suman ahora las emisiones resultantes de la combustión de materia carbonada, principalmente combustibles fósiles, que se elevan a 26,5 Gt anuales de CO₂ en el período 2000–2005 (Figura 3), junto a otras emisiones industriales y agrícolas de 5,9 Gt/a, de inferior magnitud.^[1,5,6,12] Estimaciones recientes, que incluyen valores del año 2006, elevan ligeramente las emisiones globales en el período 2000–2006 a 33,3 Gt anuales de CO₂, de ellas 27,8 Gt debidas al uso de combustibles fósiles y producción de cemento y 5,5 Gt asociadas al empleo del suelo.^[13]

El metano es emitido en grandes cantidades por el medio natural y también en la producción energética, la agricultura, especialmente los cultivos de arroz, la ganadería y la degradación de residuos, por ejemplo en los vertederos. El óxido nitroso tiene origen en la actividad agrícola, como consecuencia de la aplicación de los fertilizantes nitrogenados; aunque su concentración es pequeña, su elevado tiempo de

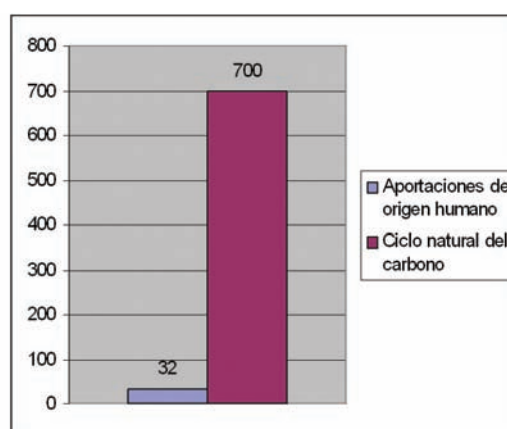


Figura 3. Cantidades anuales de CO₂ (Gt/a) emitidas a la atmósfera.

residencia en la atmósfera puede provocar efectos notables con el tiempo. La sustitución de los compuestos halocarbonados, que también son gases de efecto invernadero, por otros gases o sistemas que eviten sus efectos ambientales constituye un objetivo actual de la industria química.

A la vista de lo presentado hasta ahora, se aprecia que la mitigación del calentamiento climático guarda una íntima relación, si bien no exclusiva, con la generación y el empleo de la energía. Dejando pues para otro momento otras líneas posibles, el presente estudio se centra en las alternativas que ofrece la química para un uso y generación de la energía más eficientes, que conduzcan a un menor impacto sobre el sistema climático.

Como procedimiento para la presentación de medidas y líneas de actuación para la reducción del contenido de CO₂ en la atmósfera se pueden considerar tres fases:

- 1) Reducción de la generación de dióxido de carbono
- 2) Reducción de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera
- 3) Reducción del contenido de dióxido de carbono presente en la atmósfera

Aquí se va a considerar tan solo la primera de ellas, apuntando aportaciones que la química debe hacer a fin de reducir la generación de dióxido de carbono. Se dejan así para otra ocasión las otras dos fases.

Sobre la base de que el dióxido de carbono se genera en su mayor parte de forma concomitante a la producción de energía, la reducción de la generación de dióxido de carbono puede ser el resultado de medidas dentro de las tres líneas siguientes:

- * Reducción del consumo energético
- * Mejora de la eficiencia en el empleo de fuentes fósiles
- * Sustitución de fuentes fósiles por otras fuentes de energía

Reducción de Consumo Energético

La comparación entre el estilo de vida y comodidades materiales del habitante actual de una ciudad occidental con las de los ciudadanos de otras partes menos favorecidas del planeta, delata el enorme privilegio de la mayoría de los ciudadanos de los países desarrollados, que disfruta de un estilo de vida y unas comodidades a costa de un elevado consumo de energía.^[5] Existen muchas posibilidades de ahorro energético

en el día a día del ciudadano occidental.^[14] Sin embargo, no parece aquí el mejor lugar para entrar en el detalle de estas formas que, de manera efectiva pueden y deben contribuir a mitigar el efecto invernadero.

La industria química no constituye uno de los sectores industriales de mayor consumo energético. Resulta patente que existen campos muy importantes abiertos al ahorro energético: metalurgia, cemento, entre otros, como se presenta en la Tabla 1 y en la Figura 4.^[6,15] Sin embargo, al prestar atención a la química, no se puede dejar de citar aquí que la reducción de consumo energético en la industria química constituye uno de los objetivos propios de la Química Sostenible.

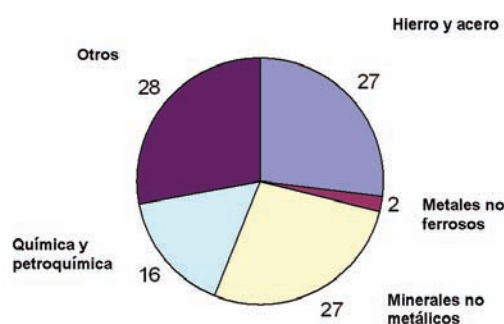


Figura 4. Porcentajes de emisiones anuales de CO₂ a la atmósfera por sectores industriales.

Tabla 1. Grandes fuentes estacionarias industriales de CO₂, con emisiones de más de 100.000 t anuales.^[6]

Fuente	Emisiones (Mt/año)
Generación de electricidad	10.359
Producción de cemento	932
Refinerías	798
Hierro y acero	646
Industria petroquímica	379
Procesado de petróleo y gas	50
Otras fuentes	30
Bioetanol y bioenergía	91
Total	13.466

El ahorro en el consumo energético por razones económicas ha sido una de las preocupaciones tradicionales de la ingeniería química: la contribución del coste energético en la producción química se cifra en un 10 % de media; 2 % en la farmacéutica y 40 % en la básica.^[16] La visión de la química sostenible añade ahora la constatación de que todo consumo energético comporta de manera indirecta la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera. Se reduce el consumo energético cuando las materias de partida del proceso químico industrial y reactivos presentan un bajo impacto histórico por ser próximas a las fuentes, preferentemente renovables; cuando una eficiencia elevada en el proceso químico provoca una

mínima formación de productos secundarios y concomitantes y la simplificación de los procesos de separación y de purificación; cuando la seguridad y limpieza intrínsecas del proceso reducen la necesidad de medidas paliativas, energéticamente costosas, que eviten accidentes y diseminación de sustancias contaminantes.^[17-20]

La química tiene que hacer valiosas aportaciones dentro de la reducción del consumo energético. Un número considerable de ellas tiene relación con la consecución de nuevos materiales. Algunos objetivos pueden ser los siguientes:

- Espumas de poro suficientemente pequeño para conseguir aislantes térmicos que combinen las propiedades térmicas que ofrecen los paneles a vacío con las propiedades mecánicas y estabilidad de la lana de vidrio, o las espumas de poliuretano o de poliestireno. De esta forma se puede conseguir un mejor aislamiento térmico de edificios.
- Materiales superconductores de más fácil aplicación y menor coste que los de óxido de itrio-bario-cobre actuales, para conseguir una menor resistencia en la conducción eléctrica, sin pérdidas de carga ni disipación de calor.
- Materiales que reúnan la aparente contradicción de una buena conductividad eléctrica y una mala conductividad térmica y así poder aplicar de manera eficiente el efecto termoelectrónico para la conversión directa del calor en electricidad.
- La superación del conflicto entre la ligereza de los materiales y unas propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia a la corrosión, que permita la construcción de vehículos más ligeros y un ahorro importante en el transporte.
- Nuevos materiales para los electrodos y electrolitos de las baterías electroquímicas y los condensadores de doble capa (supercondensadores) electrolíticos, las formas más eficientes y comunes de acumulación de la electricidad.^[16]

Mejora de la eficiencia en el empleo de los combustibles fósiles

Motores y generadores. Pilas de combustible

Resulta notable la baja eficiencia de los motores Diesel o de gasolina (15-35 %) o de las turbinas (35-50 %) empleados en tracción y en la generación de electricidad, en contraste con los motores y los generadores eléctricos (90-97 %).^[8] Existen fundadas esperanzas de que las pilas de combustible aporten un notable incremento en la eficiencia de los sistemas de generación de energía, aun cuando se tenga que recurrir al uso de hidrógeno producido a partir de fuentes fósiles (véase más abajo). Como puede constatarse en una excelente revisión acerca del tema,^[21,22] las pilas de combustible son razonablemente eficientes y se pueden emplear en electro-tracción, como generadores portátiles o estacionarios de electricidad. Existe ya una variedad de tipos de pilas de combustible, basadas en diferentes materiales, temperaturas de funcionamiento (desde 1000 °C a temperatura ambiente) y combustibles, tales como por ejemplo, hidrógeno para los automóviles, metanol para equipos pequeños o gas natural o biogas para los generadores fijos. Sin embargo, se han de solucionar un número importante de problemas relacionados con los materiales que constituyen la estructura de las pilas, los catalizadores, los electrolitos y, en especial, los electrodos. En relación con estos últimos, es importante superar la necesidad de empleo de metales nobles; son importantes los

La química en la mitigación del cambio climático. Reducción de la generación de CO₂

problemas de corrosión y la disolución del metal empleado como electrodo. En cualquier caso, se necesita una reducción de coste y un incremento de duración para que se generalice su empleo.

Descarbonización. Hidrógeno a partir de fuentes fósiles

Otro enfoque para plantear una reducción de la generación de dióxido de carbono se apoya en el concepto de descarbonización del combustible, que supone en definitiva el uso del hidrógeno como vector energético. El hidrógeno es actualmente producido a partir de los combustibles fósiles. El procedimiento más extendido se basa en el reformado al vapor del gas natural, según las ecuaciones 1–3.^[23–25]



La capacidad energética del combustible fósil de partida transferida al hidrógeno no supera el 76 % y el cociente CO₂/kJ es más desfavorable con hidrógeno que con la combustión directa del material fósil. La energía basada en el hidrógeno tenía en el año 2000 un coste tres veces superior al de la derivada del gas natural.^[26,27]

Se puede también producir hidrógeno por craqueo térmico del gas natural, que lleva a la formación de carbón junto al hidrógeno, según la ecuación 4.^[23–25,28]



El proceso es endotérmico y requiere temperaturas por encima de los 1200°C, a menos que se utilicen catalizadores metálicos (700–900°C) o mejor, carbón (1000–1100°C). En comparación con el reformado del gas natural, el craqueo presenta ventajas en cuanto a generación de CO₂ (0,05 frente a 0,43 mol/mol de H₂) y evita la necesidad de su captura y fijación, pero la eficiencia de generación de hidrógeno a partir del metano está a favor del proceso de reformado (75 frente a 58 %). El carbón que se forma en el craqueo resulta útil en la producción de composites ligeros, con buenas propiedades mecánicas, o para la mejora de terrenos de cultivo agrícola.^[28]

El empleo del hidrógeno como vector energético tiene muchos partidarios y ofrece unos atractivos notables junto a riesgos e incógnitas.^[29] La materia de partida obvia para la producción del hidrógeno es el agua. La disociación del agua puede tener lugar termoquímicamente de manera directa a 2000°C, o bien mediante ciclos redox, que pueden transcurrir entre 500 y 800°C y ser alimentados por energía térmica solar, o nuclear.^[26,27] La disociación electroquímica del agua presenta una eficiencia relativamente buena (60–73 %), pero está condicionada por la generación de la electricidad necesaria.

Resulta necesario hacer aquí una llamada de atención al posible impacto ambiental asociado al uso tecnológico del hidrógeno como vector energético. El uso generalizado a escala mundial conlleva la necesaria existencia de fugas. Las referencias que se encuentran en la Bibliografía acerca del impacto del hidrógeno quedan restringidas al referente de los procesos de su producción. Sin embargo, la estimación es que el contenido de hidrógeno en la atmósfera debe aumentar, de

ahí llegar a la estratosfera y convertirse en agua, en forma de cristallitos de hielo que pueden catalizar la destrucción del ozono estratosférico.^[30]

Sustitución de fuentes fósiles por otras fuentes de energía

Existen fuentes de producción energética que no suponen un incremento de dióxido de carbono en la atmósfera, algunas de ellas denominadas renovables que, de una manera más o menos directa, aprovechan la energía solar: la propia energía solar, la hidráulica, la eólica, además de las diversas posibilidades de energía oceánica y geotérmica. La biomasa es una fuente renovable de energía y constituye de hecho una forma acumulada de energía solar, pero difiere de las anteriores en que es a la vez consumidora y generadora de CO₂. Por este motivo es frecuente referirse a la biomasa como una fuente neutra.^[31] Sólo se van a comentar aquí la energía solar y la biomasa, dado que las demás fuentes se basan en principios físicos y no requieren unas aportaciones específicas de la química. Debe destacarse de entrada una característica limitante común a las aplicaciones basadas en la energía solar y en la biomasa: su bajo rendimiento energético por unidad de superficie.

Energía solar

Se calcula que la potencia de la energía solar incidente sobre el planeta se eleva a 120.000 TW, cantidad muy superior a unas necesidades humanas (20 TW) que podrían ser satisfechas con 0,16 a 0,3 % de la superficie terrestre cubierta por receptores con un 10 a un 25 % de conversión.^[5,16] Como atractivo adicional importante, la energía solar ofrece la posibilidad de proporcionar la energía en lugares apartados, con dificultades de suministro a través de una red; la situación actual de unos 1.600 millones de personas. Con todas las limitaciones debidas a su carácter difuso (170 W·m⁻²) e intermitencia, la energía solar es muy probablemente la fuente renovable con mayores posibilidades de futuro, que justifican el esfuerzo para el desarrollo de técnicas de aprovechamiento basadas en las conversiones térmica, fotovoltaica, fotoelectroquímica y fotosintética.

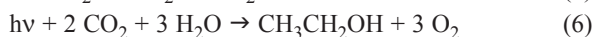
La conversión térmica puede trabajar a baja temperatura para la calefacción de líquidos, como ya se está utilizando en la actualidad para uso doméstico y de ella sólo falta por añadir que no es despreciable su contribución a la reducción del consumo de combustibles fósiles. Parece ahora más interesante, sin embargo, el desarrollo de la conversión térmica a alta temperatura, que puede dar lugar a aplicaciones de interés industrial y puede llegar a ser la forma fundamental de aprovechamiento de la energía solar para la generación de electricidad.^[32] La pieza clave que necesita desarrollo para la conversión térmica de la luz solar es el colector. Su eficiencia actual es de un 75 % y sus elementos esenciales son materiales absorbentes y aislantes, un transferidor de calor y el reflector. Es urgente la búsqueda de nuevos materiales para los absorbentes actualmente usados, problemáticos ecológicamente o muy costosos, y para el fluido transferidor.

Con respecto a la conversión fotovoltaica en energía eléctrica, actualmente predominan las células solares de silicio cristalino, que no resultan eficientes económicamente, con eficiencias energéticas entre 5 y 15 %, duración de cerca de 30

años, amortización energética de 2 a 4 años y una productividad que, al fin puede alcanzar 10 veces su coste de producción.^[5] No resulta trivial la cuestión acerca del impacto ambiental que pueden crear estas placas solares una vez obsoletas. El coste de fabricación, la baja eficiencia y la baja duración de las placas fotovoltaicas reclaman nuevos principios y nuevos materiales. Varias empresas químicas están invirtiendo cantidades importantes en el desarrollo de sistemas moleculares orgánicos, que de momento presentan una eficiencia muy baja (< 5%), pero que deben permitir rebajar costes y peso y aumentar la superficie y la flexibilidad de las células.^[5]

La conversión fotoelectroquímica emplea electrodos semiconductores de dióxido de titanio junto a colorantes que potencian la absorción de la radiación solar, para generar hidrógeno por disociación del agua.^[5,26] El nivel de eficiencia por ahora sólo alcanza un 11 % a escala de laboratorio y valores inferiores a mayor escala, excesivamente bajos por el momento para poder llegar a una producción tecnológica de hidrógeno.

Se habla con frecuencia de sistemas químicos, bioquímicos o biomiméticos, que aprovechan la energía radiante para la disociación del agua, o imitan la función del sistema fotosintético de las plantas. Uno de ellos por ejemplo, emplea catalizadores de rutenio.^[26] La fotosíntesis artificial puede conducir a la producción de hidrógeno a partir del agua, o de etanol a partir del dióxido de carbono, según las ecuaciones 5 y 6, por imitación de la organización molecular y supramolecular de la fotosíntesis natural. Una de las dificultades que presenta el proceso consiste en que, mientras la absorción de luz tiene lugar por transferencia de un solo electrón, tanto la disociación del agua, como la reducción del dióxido de carbono, implican transferencias de más de un electrón.^[5] Aunque esperanzadores, estos estudios están todavía en sus comienzos y muy lejos todavía de su aplicación tecnológica.



Biomasa

La biomasa es la fuente renovable de energía de más larga tradición; de hecho la primera empleada en la historia. La biomasa debe satisfacer a escala mundial las necesidades alimentarias, de materiales y de materias primas para la industria, ahora y en el futuro. No existe unanimidad en la visión, pero parece bastante general la aceptación de que no existe peligro para asegurar la alimentación de una población mundial que tiende a estabilizarse, y para la producción de los productos y materiales industriales. La previsión se hace menos optimista cuando se considera la generación de energía; parece que la biomasa sólo puede cubrir un 16 % de la demanda energética presumible para 2050.^[33-36]

De acuerdo con diversos estudios, el potencial energético actual de la producción vegetal a escala mundial es aprovechado tan solo en sus dos quintas partes, si bien con una distribución muy irregular;^[34] resulta preocupante la producción futura, especialmente en Europa,^[35] y la opinión general es que la satisfacción de la demanda energética exigiría la expansión de los cultivos a unas dimensiones muy superiores a las actuales, con el consiguiente impacto ambiental.^[33,36-39] Sin embargo podría resultar muy conveniente una expansión de los cultivos en zonas desérticas o en terrenos de baja cali-

dad, como podría representar el cultivo de plantas como la jatrofa para la producción de biodiesel.^[38] Se considera también la necesidad de una agricultura y una silvicultura basadas en la biotecnología, con el cultivo de plantas idóneas para la producción de energía.^[39,40] Destacan así mismo las ventajas de la vegetación silvestre, en terrenos de escaso valor para el cultivo agrícola.^[32,41]

Idealmente el dióxido de carbono emitido a la atmósfera en la combustión de materia vegetal, o de un carburante producido a partir de ella, no debería ser superior al que las plantas han consumido de la atmósfera para su crecimiento. Sin embargo, el cultivo supone una roturación de terreno, el empleo de fertilizantes y pesticidas y la recolección y conversión en biocombustible en la refinería, todo ello con un consumo de energía que puede ser próximo al que proporciona el carburante obtenido. Por ejemplo, el exceso energético del biogasóleo es de un 93 %, pero el bioetanol sólo proporciona un 25 % de energía superior a la consumida en su producción.^[42]

La forma más antigua de utilización de la biomasa para la generación de energía, la combustión de residuos agrícolas o forestales para calefacción doméstica o para la generación de electricidad, resulta muy poco eficiente (entre 15 y 20 %).^[43,44] Mejor resulta su conversión en biogasóleo, etanol, aceites (biooil), biogas, gas de síntesis, o incluso hidrógeno, combustibles que pueden ofrecer una mayor eficiencia y mayor facilidad de manejo. Pero estas conversiones (Figura 5) implican tecnologías en un estado claramente inmaduro.

CULTIVOS ESPECÍFICOS

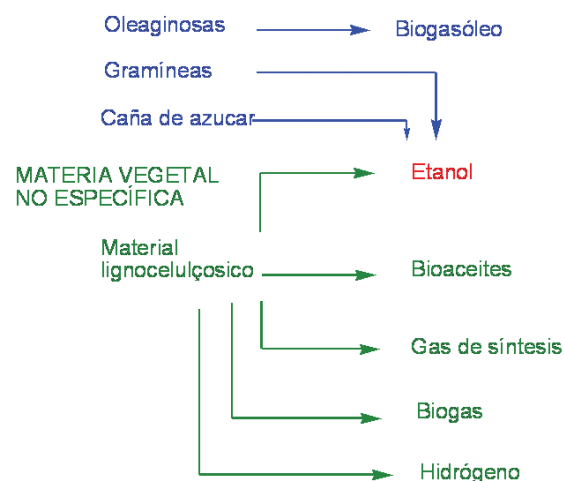


Figura 5. Carburantes asequibles a partir de la biomasa.

La producción de biogasóleo se basa en un proceso de transesterificación. A pesar de la simplicidad del proceso, se hace necesaria la optimización de catalizadores, mejora de rendimientos, reducción de consumo energético y técnicas que faciliten la separación de las fases, constituidas por líquidos moderadamente viscosos.

Una consecuencia de la producción de biogasóleo es una extraordinaria disponibilidad de glicerina. De hecho se obtiene 1 kg de glicerina por cada 9 kg de carburante. La glicerina y algunos de sus esteres tiene aplicaciones en alimentación, cosmética, preparados farmacéuticos, o como plastificante, pero la demanda habitual de estos productos no es capaz de consumir toda la que se genera ahora en la producción del biogasóleo. La necesidad de una mayor rentabilidad en la producción del carburante y el fácil acceso, lleva a

La química en la mitigación del cambio climático. Reducción de la generación de CO₂

la búsqueda intensa de nuevas aplicaciones de la glicerina.^[45,46] Como ejemplo del interés en este tema, uno de los *Green Chemistry Presidential Awards* fue concedido el pasado año a una empresa por la conversión de la glicerina en 1,2-propilenglicol, un sustituto menos tóxico del etilenglicol.^[47]

Las cuestiones que plantea el proceso de producción de etanol son mucho mayores y variadas. La formación de etanol tiene su base en la fermentación de las hexosas, según la ecuación 7, que se encuentran originariamente en forma polimérica como almidón o, en mayor abundancia como celulosa.



En la actualidad se está produciendo etanol a partir del grano de maíz en Estados Unidos de Norteamérica y de la caña de azúcar en Brasil, pero la aplicabilidad futura de la producción de etanol depende de la rentabilidad de su obtención a partir del material lignocelulósico, la materia realmente abundante en el reino vegetal y que no requiere competir con la producción agrícola alimentaria.^[48]

El proceso consiste, según se muestra en la Figura 6, en el tratamiento para la separación de lignina y celulosas, que en la actualidad es todavía poco efectivo y económico. Esta separación proporciona una mezcla de celulosa y hemicelulosas, que debe ser hidrolizada por catálisis ácida o enzimática. Cualquiera de los dos métodos es todavía muy problemático: el primero viene acompañado de deshidrataciones y el segundo resulta muy lento.^[49] Por otro lado, los enzimas empleados presentan un coste elevado con relación al valor económico del producto final. La hidrólisis en cualquier caso proporciona una mezcla de glucosa y pentosas. La conversión con fermentos convierte las hexosas en etanol, pero no es efectiva para las pentosas. Aunque en los últimos años se han conseguido cepas modificadas genéticamente que permiten también la conversión de las pentosas, no tienen todavía un uso generalizado. El etanol así formado debe ser separado de la disolución acuosa por destilación, en un proceso que consume una cantidad considerable de energía y luego desecado por destilación azeotrópica o con tamiz molecular para conseguir etanol absoluto, si debe ser empleado como aditivo de la gasolina. El rendimiento del proceso en su conjunto es bajo y reclama mejoras sustanciales en cada una de sus fases. El bajo rendimiento energético está asociado en gran medida a la destilación, que parte de una disolución acuosa diluida. Esta es una consecuencia de una dificultad íntimamente vinculada a los procesos fermentativos, como es la inhibición de la conversión que ocasiona el producto de la misma. Esta situación puede mejorar notablemente mediante la introducción de técnicas adecuadas de separación, con membranas selectivas para alcanzar disoluciones con mayor concentración de

etanol, o membranas de pervaporación para simplificar la destilación.^[50] La rentabilidad de la producción de etanol puede aumentar, por otra parte, si se consigue dar utilidad a las fracciones secundarias, tales como las ligninas o la mezcla resultante de la fermentación, en la que se encuentran cantidades importantes de aminoácidos y proteínas. El uso del bioetanol como aditivo a la gasolina no está exento, por otra parte, de varios problemas técnicos asociados al carácter corrosivo del etanol y a la fácil separación de fases.^[51]

Un procedimiento simple de transformación de la biomasa en un combustible consiste en la fermentación anaeróbica que conduce al llamado biogas. La materia de partida puede estar constituida por residuos vegetales, solos o junto a residuos de origen animal, con una composición óptima 25/1 en C/N. El biogas está compuesto fundamentalmente por metano (65 %), dióxido de carbono (30 %) y una pequeña cantidad (5 %) de amoníaco, sulfuro de hidrógeno y otros componentes minoritarios. El biogas puede dar calor, alumbrado, o accionar motores. Se considera una excelente fuente de energía para zonas rurales, en las que los barros resultantes de la fermentación tienen un buen valor adicional como fertilizante.^[52] Se utiliza el biogas en las industrias de alimentación y de bebidas, con aguas residuales de alto contenido orgánico y se proyecta ya su producción a gran escala.^[43] Se estima que en el año 2002 existían en Europa 4500 equipos de biogas y se espera que su producción de calor y electricidad sean 10 veces superiores en 2020.^[53] Esto ha estimulado el estudio de la mejora de los procesos fermentativos y del aprovechamiento de los productos secundarios, en particular de los compuestos nitrogenados y fosforados.^[16]

El metano se genera en cantidades significativas en los vertederos de materia orgánica. Resulta económicamente rentable la instalación de sistemas de recogida del gas para uso como fuente energética, que de otra forma incrementaría el efecto invernadero.^[43]

Las diversas formas de tratamiento termoquímico permiten la transformación de la biomasa en combustibles o en materias primas para la industria química. Existen diversos procesos que ofrecen claras perspectivas de uso en el futuro, al proporcionar una mayor eficiencia energética de la biomasa y no requerir monocultivos específicos.^[48] Estos procedimientos generan gases utilizables directamente para la generación de calor o en motores de explosión, o aceites que pueden entrar en el tren de refinado y proporcionar carburantes asimilables a los derivados del petróleo.^[54] Cualquiera de los procedimientos termoquímicos produce cantidades de carburantes muy superiores (entre 3 y 5 veces) a las de etanol obtenible a partir de la misma fuente.^[32]

La pirólisis anaeróbica de la biomasa a temperaturas alrededor de los 500 °C produce gases, aceites y carbón sólido o

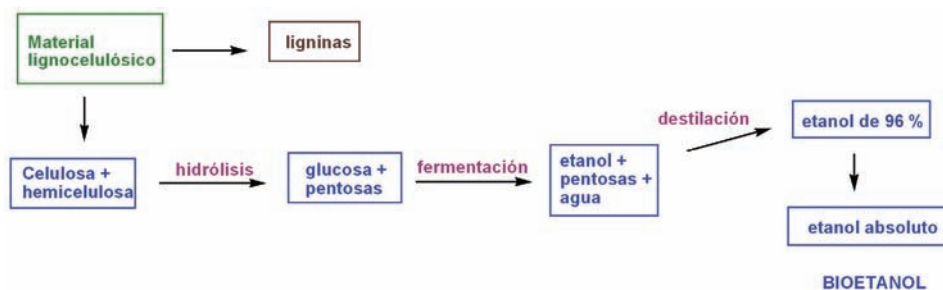
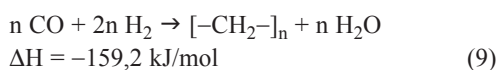


Figura 6. Proceso de producción de etanol a partir de material lignocelulósico.

alquitranes. Se puede conseguir del orden del 70 % de un aceite (biooil) ácido y corrosivo, con un contenido de oxígeno próximo al 40 %, que requiere una hidrogenación previa a cualquier uso.^[43]

La gasificación de la biomasa produce mezclas de monóxido de carbono e hidrógeno, junto a metano, dióxido de carbono, otros gases minoritarios y alquitranes. El proceso es ampliamente utilizado en zonas rurales, en las que se emplean residuos agrícolas, tales como la cascarilla de arroz, para generar calor y electricidad. Por otra parte, la mezcla de gases de la gasificación de la biomasa constituye, con variaciones de composición, el llamado gas de síntesis. La aplicación del bien conocido proceso de Fischer-Tropsch conduce a la formación de hidrocarburos de cadena adecuada para uso como carburantes, según la ecuación 9. El procedimiento no está exento de dificultades, tales como la regulación de las proporciones de monóxido de carbono e hidrógeno, o la eliminación de cualquier cantidad de amoníaco, sulfuro de hidrógeno o alquitranes presente en los gases de partida.^[55]



La biomasa puede ser también fuente para la producción de hidrógeno. Una de las formas consiste en su gasificación, ya comentada, seguida de la separación del hidrógeno del resto de los componentes de la mezcla.^[56] Existen estudios interesantes en fase de laboratorio para la producción de hidrógeno por fermentación en dos fases de material lignocelulósico procedente de residuos agrícolas y de industrias alimentarias.^[57]

Con lo expuesto a lo largo de este escrito, queda de manifiesto que la química juega un papel crucial en la mayoría de las tecnologías necesarias para conseguir una reducción substancial en la generación de CO₂ y con ella sus emisiones a la atmósfera. No existe un único campo ni disciplina química exclusiva para este fin. En lo expuesto aparece evidente la importancia de la catálisis, la ciencia de los materiales, la fotoquímica, la electroquímica, o la química de los procesos fermentativos. Pero todo especialista ha de ser capaz de detectar aquellas aportaciones más afines a su experiencia. En cualquier caso resulta patente la necesidad urgente de líneas de investigación multidisciplinarias: Física-Química-Biología, que den soporte a las tecnologías necesarias.

Bibliografía

- [1] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Basis, Summary for Policy Makers*, Paris, February 2007; <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>, visitado el 1/11/2007.
- [2] J. E. Figueruelo, M. M. Dávila, *Química Física de los Procesos Medioambientales*, Reverté, Barcelona, 2004, p 13 y ss.
- [3] Refuerzo radiante (*radiative forcing*) expresa cualquier perturbación en el balance energético del sistema climático en forma equivalente a un incremento positivo o negativo (normalmente en W/m²) de la radiación incidente. El *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC en sus siglas inglesas) toma como referencia la situación del año 1750.
- [4] J. Hansen, M. Sato, R. Ruedy, A. Lacis, V. Oinas, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2000, 97, 9875–9880.
- [5] N. Armaroli, V. Balzani, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2007, 46, 52–66.
- [6] IPCC Special Report. *Carbon Dioxide Capture and Storage*, prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.: B. Metz, O. R. Davidson, H. de Coninck, M. Loos, L. Meyer). Cambridge University Press, Cambridge, 2005.
- [7] IPCC. *Summary for Policy Makers en: Climate Change 2007. Mitigation of Climate Change*. Contribution of the Working Group III to the Fourth Assessment Report in the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.: B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. Meyer). Cambridge University Press, Cambridge, 2007, pp. 1–23; http://www.mnp.nl/ipcc/pages_media/AR4-chapters.html, visitado el 12/11/2007.
- [8] M. I. Hoffert, K. Caldeira, G. Benford, D. R. Criswell, C. Green, H. Herzog, A. K. Jain, H. S. Khesghi, K. S. Lackner, J. S. Lewis, H. D. Lightfoot, W. Manheimer, J. C. Mankins, M. E. Mauel, L. J. Perkins, M. E. Schlesinger, T. Volk, T. M. L. Wigley, *Science*, 2002, 298, 981–987.
- [9] P. J. Crutzen, *Climatic Change*, 2006, 77, 211–220.
- [10] G. Bala, K. Caldeira, M. Wickett, T. J. Phillips, D. B. Lobell, C. Delire, A. Mirin, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2007, 104, 6550–6555.
- [11] J. H. Holder en *Handbook of Green Chemistry and Technology* (Eds.: J. Clark y D. Macquarrie), Blackwell Publishing, Oxford, 2002, p 28.
- [12] S. Pacala, R. Socolow, *Science*, 2004, 305, 968–971.
- [13] J. G. Canadell, C. Le Quéré, M. R. Raupach, C. B. Field, E. T. Buitenhuis, P. Ciais, T. J. Conway, N. P. Gillett, R. A. Houghton, G. Marland, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2007, en prensa; <http://www.pnas.org/cgi/reprint/0702737104v1.pdf>, visitado el 12/11/2007.
- [14] H. Pilcher, *Chemistry World*, 2007, 4(2), 40–43.
- [15] R. Dixon, *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO₂ Emissions*, International Energy Agency, OECD/IEA, 2007.
- [16] *Energieversorgung der Zukunft. Der Beitrag der Chemie*, März, 2007, 1–39; <http://www.gdch.de/oearbeit/energie.pdf>, visitado el 16/11/2007.
- [17] P. T. Anastas, J. C. Warner, *Green Chemistry. Theory and Practice*, Oxford University Press, Oxford, 2000.
- [18] R. Mestres, *An. Quím.*, 2003, 99(3), 58–65.
- [19] R. Mestres, *Green Chem.*, 2004, 6, G10–G12.
- [20] R. Mestres, *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2005, 12, 128–132.
- [21] J. Peña-Martínez, D. Pérez-Coll, J. C. Ruiz-Morales, D. Marrero-López, P. Núñez-Coello, B. Ballesteros-Pérez, P. Gómez-Romero, J. Canales-Vázquez, *An. Quím.*, 2006, 102(3), 22–30.
- [22] J. Peña-Martínez, D. Pérez-Coll, J. C. Ruiz-Morales, D. Marrero-López, P. Núñez-Coello, B. Ballesteros-Pérez, P. Gómez-Romero, J. Canales-Vázquez, *An. Quím.*, 2006, 102(4), 5–14.
- [23] M. Steinberg, *Int. J. Hydrogen Energ.*, 1999, 24, 771–777.
- [24] H. Arakawa, M. Aresta, J. N. Armor, M. A. Barteau, E. J. Beckman, A. T. Bell, J. E. Bercaw, C. Creutz, E. Dinjus, D. A. Dixon, K. Domen, D. L. DuBois, J. Eckert, E. Fujita, D. H. Gibson, W. A. Goddard, D. W. Goodman, J. Keller, G. J. Kubas, H. H. Kung, J. E. Lyons, L. E. Manzer, T. J. Marks, K. Morokuma, K. M. Nichofas, R. Periana, L. Que, J. Rostrup-Nielson, W. M. H. Sachtler, L. D. Schmidt, A. Sen, G. A. Samorjai, P. C. Stair, B. R. Stults, W. Turnas, *Chem. Rev.*, 2001, 101, 953–996.
- [25] R. M. Navarro, M. A. Peña, J. L. G. Fierro, *Chem. Rev.*, 2007, 107, 3952–3991.

La química en la mitigación del cambio climático. Reducción de la generación de CO₂

- [26] S. S. Penner, *Energy*, **2006**, *31*, 33–43.
- [27] J. A. Turner, *Science*, **2004**, *305*, 972–974.
- [28] N. Z. Muradov, T. N. Vaziroglu, *Hydrogen Energy*, **2005**, *30*, 225–237.
- [29] A. Midilli, M. Ay, I. Dincer, M. A. Rosen, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **2005**, *9*, 255–271.
- [30] T. K. Tromp, R. L. Shia, M. Allen, M. J. Eiler, Y. L. Yung, *Science*, **2003**, *300*, 1740.
- [31] B. Sørensen, *Renewable Energy. Its physics, engineering use, environmental impacts, economy and planning aspects*, Third Ed, Elsevier, Amsterdam, **2004**, pp 478–510.
- [32] R. Shinnar, F. Citro, *Science*, **2006**, *313*, 1243–1244.
- [33] B. Dale *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **2003**, *78*, 1093–1103.
- [34] M. Parikka, *Biomass Bioenerg.*, **2004**, *27*, 613–620.
- [35] G. Tuck, M. J. Glendinning, P. Smith, J. I. House, M. Wattenbach, *Biomass Bioenerg.*, **2006**, *30*, 183–197.
- [36] C. Okkerse, H. van Bekkum, *Green Chem.*, **1999**, *1*, 107.
- [37] L. Reijnders, *Energy Policy*, **2006**, *34*, 863–876.
- [38] D. Fairless, *Nature*, **2007**, *449*, 652–655.
- [39] A. J. Ragauskas, C. K. Williams, B. H. Davison, G. Britovsek, J. Cairney, C. A. Exkert, W. J. Frederick Jr., J. P. Hallett, D. J. Leak, C. L. Liotta, J. R. Mielenz, R. Murphy, R. Templer, T. Tschaplinski, *Science*, **2006**, *311*, 484–489.
- [40] J. S. McLaren, *Trends Biotechnol.*, **2005**, *23*, 339–342.
- [41] D. Tilman, J. Hill, C. Lehman, *Science*, **2006**, *314*, 1598–1600.
- [42] J. Hill, E. Nelson, D. Tilman, S. Polansky, D. Tiffany *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **2006**, *103*, 11206–11210.
- [43] A. P. C. Faaij, *Energy Policy*, **2006**, *34*, 322–342.
- [44] G. W. Huber, S. Iborra, A. Corma, *Chem. Rev.*, **2006**, *106*, 4044–4098.
- [45] M. Pagliaro, R. Ciriminna, H. Kimura, M. Rossi, C. Della Pina, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2007**, *46*, 4434–4440.
- [46] A. Corma, S. Iborra, A. Velty, *Chem. Rev.*, **2007**, *107*, 2411–2502.
- [47] S. K. Ritter, *Chem. Eng. News*, **2006**, *84*(27), 10.
- [48] DG ENV B1 Agriculture, Forest and Soil, *Environmental Aspects of Bio-Energy Developments*, March **2007**.
- [49] M. H. Penner, A. G. Hashimoto, A. Estghalian, J. J. Fenske, en *Agricultural Materials as Renewable Resources* (Eds.: G. Fuller, T. A. McKeon, D. B. Bills), ACS Symposium Series *647*, American Chemical Society, Washington, **1996**, 12–31.
- [50] L. M. Vane, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **2005**, *80*, 603–629.
- [51] R. K. Niven, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **2005**, *9*, 535–555.
- [52] C. Polprasert, *Organic Waste Recycling*, 2^a Ed., John Wiley, New York, **1996**.
- [53] International Energy Agency, *Good Practice Guidelines. Bioenergy Project Development and Biomass Supply*, OECD/IEA, **2007**.
- [54] G. W. Huber, A. Corma, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2007**, *46*, 7184–7201.
- [55] M. J. Prins, K. J. Ptasinski, F. J. J. G. Janssen, *Fuel Process. Technol.*, **2004**, *86*, 375–389.
- [56] M. Ni, D. Y. C. Leung, M. K. H. Leung, K. Sumathy, *Fuel Process. Technol.*, **2006**, *87*, 461–472.
- [57] I. K. Kapdan, F. Kargi, *Enzyme Microb. Tech.*, **2006**, *38*, 569–582.



ICIQ
summer
school

Tarragona, July 21-25, 2008



Speakers:

- Prof. Varinder Aggarwal
Brask University
- Prof. Ernesto Carmona
Universidad de Sevilla
- Prof. Dennis P. Curran
University of Pittsburg
- Prof. Mark Lautens
University of Toronto
- Prof. Angel R. de Lera
Universidad de Vigo
- Prof. Kilian Müñiz
Université de Strasbourg
- Prof. Andreas Pfaltz
University of Basel
- Prof. Miguel Á. Sierra
Universidad Complutense de Madrid
- Prof. Antonio M. Echavarren
Institute of Chemical Research of Catalonia

Directors:

- Antonio M. Echavarren
- Miguel Ángel Sierra

Contact:

<http://www.iciq.es>

