

# La química verde en México

MARIO YARTO RAMÍREZ,  
ARTURO GAVILÁN GARCÍA Y  
MIGUEL ÁNGEL MARTÍNEZ CORDERO



La química verde consiste en el desarrollo de las metodologías para modificar la naturaleza de los productos o procesos para reducir los riesgos que estos representan para la salud y el ambiente. En México se han desarrollado algunos esfuerzos para el desarrollo de nuevas sustancias, productos y procesos amigables con el ambiente. Sin embargo, hace falta una mayor coordinación y apoyo entre los diversos actores involucrados.

## INTRODUCCIÓN

La percepción sobre la química adquiere básicamente dos formas: para la gente relacionada con la ciencia y la industria es vista como la solución a los problemas, el medio para llegar al desarrollo y el origen de los bienes de uso diario; y para el ciudadano común, resulta algo peligroso y que debe ser evitado a toda costa. Sin embargo, ninguno de estos dos pun-

tos de vista es completamente correcto, ya que la química involucra todos los aspectos de la transformación de la materia y la energía. Además, una forma común de pensar era considerar que el desarrollo tecnológico tenía un costo ambiental necesario (Anastas 1998).

Durante la revolución industrial se tenía la visión de que los recursos naturales eran infinitos y que el medio natural debía ser domesticado mediante la tecnología (McDonough 1998). Por el contrario, durante los últimos años, las cuestiones ambientales comenzaron a tener presencia en la opinión pública, lo que llevó a los gobiernos al reconocimiento del problema y de lo limitado de los recursos. Derivado de esto, se empezó a generar normatividad y con esto se iniciaron los primeros esfuerzos de la industria y la academia para desarrollar nuevos procesos y sustancias de menor toxicidad con la finalidad de reducir la emisión de contaminantes y dar cumplimiento al marco normativo de reciente creación.

Durante el periodo previo al advenimiento de la legislación se acostumbraba la liberación de los contaminantes en forma directa en el aire, agua y suelo. Por otro lado, se pensaba que el decremento en la concentración de los contaminantes en el medio era una solución suficiente para reducir los efectos de estas sustancias, lo que es conocido como “la dilución en la solución a la contaminación.” (Anastas 1998)

Posteriormente, con el avance en la normatividad y el conocimiento de los mecanismos de acción de los contaminantes en el medio, se generaron límites para la emisión de contaminantes al ambiente. La solución más adecuada para esto parecía ser el uso de equipos de control de emisiones que sirvieran como barreras para cumplir con los requerimientos de la ley.

Finalmente, con la elaboración de la *Pollution Prevention Act* de los Estados Unidos de América en 1990, se comenzaron a buscar diferentes medios para

prevenir la generación de contaminantes, entre los cuales podemos mencionar controles de ingeniería, control de inventarios, optimización de procesos y el desarrollo de la química verde.

#### **LAS SUSTANCIAS PELIGROSAS Y EL AMBIENTE**

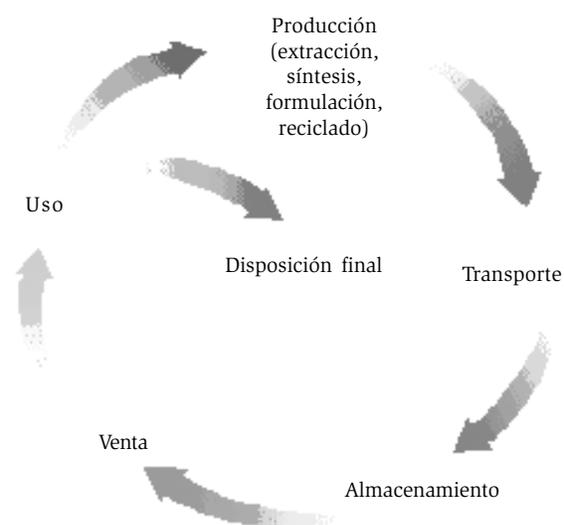
El manejo ambientalmente adecuado de las sustancias químicas peligrosas debe estar basada en cuatro premisas básicas (Cortinas 2000):

- La determinación de su peligrosidad y de la relación entre la exposición y sus efectos.
- La evaluación o caracterización de la magnitud de sus riesgos ambientales y sanitarios, tanto derivados de su liberación súbita como continua o intermitente.
- La administración o manejo de los riesgos para prevenirlos o reducirlos.
- La comunicación de los riesgos.

La liberación al ambiente de sustancias peligrosas, así como la exposición a ellas de seres humanos o de organismos de la biota acuática y terrestre, puede ocurrir en cualquiera de las fases de su ciclo de vida, tanto a partir de emisiones al aire como de descargas al agua o la ocurrencia de fugas y derrames, por lo que su control debe darse con un enfoque de ciclo de vida y multimedios (Cortinas 2000).

Para tener una idea de la magnitud del universo de las sustancias químicas y definir criterios para enfocar la atención en las más relevantes para la sociedad, desde la perspectiva de la prevención y control de riesgos, conviene señalar que se han identificado alrededor de 12 millones de sustancias en el planeta, encontrándose en el comercio mundial poco más de cien mil; de éstas menos de tres mil se producen en volúmenes superiores a una tonelada anual en más de un país; sin embargo, representan alrededor de 90% del total que se comercializa. A pesar de

GRÁFICA 1. CICLO DE VIDA DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS



Fuente: Cortinas 2000.

que se han regulado alrededor de ocho mil sustancias con base en alguna propiedad que las hacen peligrosas, no se han realizado estudios sistemáticos de su peligrosidad para la salud humana y los ecosistemas sino para un número limitado de ellas, no mayor a mil, y la evaluación de los riesgos es sobre un número todavía más pequeño. Asimismo, aun cuando la Organización de las Naciones Unidas ha elaborado una lista de cerca de 600 sustancias que han sido prohibidas, severamente restringidas, no autorizadas por los gobiernos o retiradas del comercio, únicamente unas 15 prohibidas o restringidas son objeto de control internacional de exportaciones e importaciones, a través del Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo (Cortinas 2000).

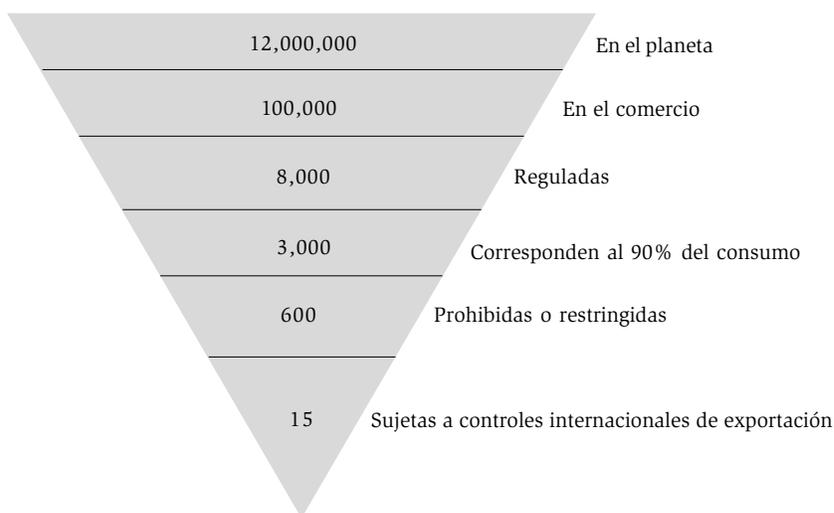
Todo esto dio origen a la concientización por parte de los profesionales de la química de un mejor desarrollo de sustancias que tuviesen menores efectos nocivos hacia el ambiente y que favorecieran la minimización de los residuos en los procesos químicos.

#### LA PRÓXIMA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL

Como consecuencia de la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Desarrollo (UNCED) realizada en 1992 en Río de Janeiro, y motivadas por la demanda social hacia la protección del medio ambiente, algunas industrias comenzaron a enfocarse en la estrategia de la “eco-eficiencia”. Con este enfoque se comenzó a modificar la forma en que la industria operaba hasta entonces (tomar, producir y desechar) hacia la integración de los temas ambientales, sociales, éticos y económicos en la forma de realizar los negocios. Uno de los ejemplos exitosos de la aplicación de estos conceptos se dio en la industria de Henry Ford en 1926, que alcanzó ahorros importantes al reciclar y reducir materiales, minimizar el uso de materiales de empaque, etc. (McDonough 1998).

La relación entre el cuidado del ambiente y la eficiencia de producción fue más claramente abor-

GRÁFICA 2. EL UNIVERSO DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS



Fuente: Cortinas 2000.

dada por el reporte titulado *Nuestro futuro común* elaborado en 1987 por la Comisión Mundial para el Desarrollo y el Medio Ambiente de la Organización de las Naciones Unidas (McDonough 1998).

A partir de entonces se comenzó a promover el reciclaje y reuso de materiales y residuos, así como de bienes de consumo, observándose una reducción de los efectos adversos al ambiente. Sin embargo, se notó que la entrada de sustancias nocivas permanece aún en menores cantidades. A partir de entonces se introdujo el concepto de eco-efectividad, con el que se busca que la industria sea regenerativa, es decir, que se generen productos que lleven de la “cuna a la cuna” y no de la “cuna a la tumba” (McDonough 1998).

En resumen, la próxima revolución industrial busca, según McDonough (1998):

1. No generar residuos al aire, agua o suelo
2. Dirigir el capital productivo hacia el uso eficiente de los recursos

3. Dirigir la productividad hacia el bienestar humano, económico y ambiental.

#### **LA QUÍMICA VERDE Y EL CONCEPTO DEL CICLO DE VIDA DE LOS PRODUCTOS**

##### **CICLO DE VIDA DE LOS PRODUCTOS QUÍMICOS**

El concepto de ciclo de vida se introdujo para evaluar los atributos ambientales de los productos químicos, y considera cinco etapas básicas: premanufactura, manufactura, envío del producto, uso y fin de su vida útil. El resultado real de esto es contar con productos ambientalmente superiores, pero sin que se violen las normas de producto (Graedel 1999). El reto para los profesionales de la química sería entonces el desarrollo de nuevos productos, procesos y servicios que cumplan con los requerimientos sociales, económicos y ambientales. Para esto se requiere reducir el consumo de materiales y energía en los procesos, minimizar la emisión al ambiente de sus

tancias químicas peligrosas, maximizar el uso de recursos renovables y extender la durabilidad y el reciclaje de los productos (Clark 1999).

LOS DOCE PRINCIPIOS DE LA QUÍMICA VERDE

La química verde consiste en el desarrollo de las metodologías para modificar la naturaleza intrínseca de los productos o procesos con la finalidad de reducir los riesgos que estos involucren tanto para el ambiente como para la salud humana (Anastas 1998).

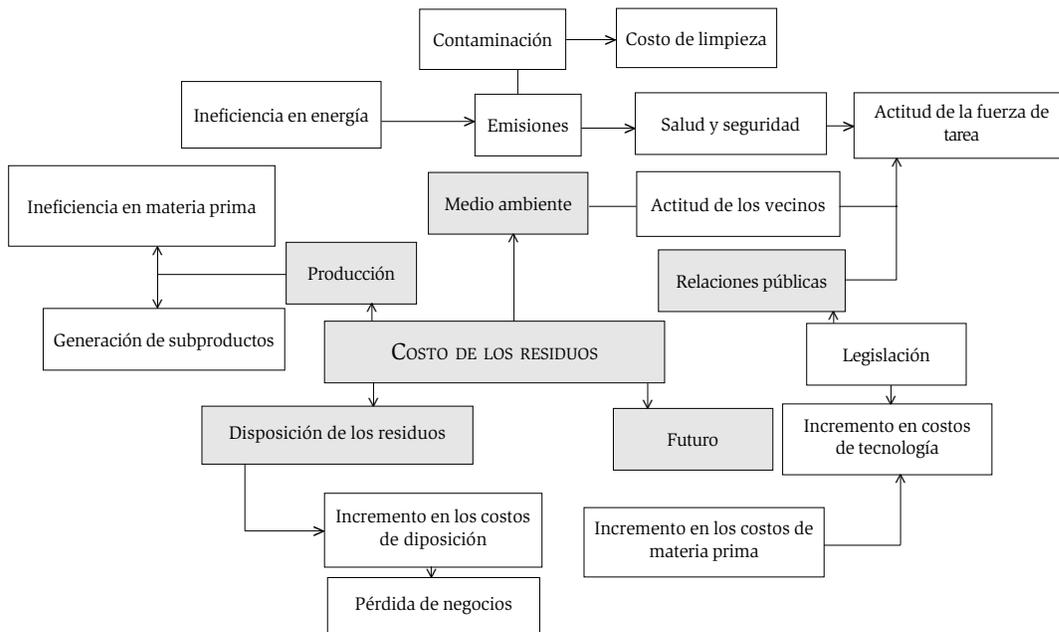
Generalmente, dentro del costo de manufactura de un producto se tiene considerado el costo de las materias primas, así como el de tratamiento y disposición de los residuos (figura 1).

Tomando en cuenta que entre más peligroso es un residuo, más caro es el disponer de éste de manera adecuada, es necesario tomar acciones para prevenir estos gastos desde el diseño mismo de los procesos utilizando las técnicas de la química verde

(Anastas 1998). Para comprender mejor esto, se enlistan a continuación sus doce principios:

1. Es preferible evitar la generación de un residuo que tratarlo o limpiarlo una vez formado.
2. Se deben desarrollar métodos que maximicen la incorporación de todos los materiales de un proceso en el producto final.
3. Cuando sea posible, se deben diseñar sustancias químicas que sean de baja o nula toxicidad para el ambiente o los seres humanos.
4. Las sustancias químicas se deben diseñar de manera que sean eficientes al mismo tiempo que tengan baja peligrosidad.
5. El uso de sustancias auxiliares (solventes, agentes de separación, etc.) debe ser evitado cuando sea posible y cuando no, se deben utilizar sustancias inocuas.
6. Se deben analizar, y de ser posible reducir, los requerimientos de energía dependiendo de sus impactos ambientales y económicos. Son prefe-

FIGURA 1. EL COSTO DE LOS RESIDUOS



Fuente: Clark 1999.



12. Las sustancias utilizadas en los procesos químicos se deben seleccionar de manera que se minimice el potencial de ocurrencia de accidentes químicos (como explosiones e incendios).

## EVOLUCIÓN DE LA INDUSTRIA QUÍMICA

### LA SITUACIÓN MUNDIAL

Hasta fines del siglo XIX la especie humana utilizaba los recursos renovables para la alimentación y para usos funcionales. Sin embargo, durante el siglo XX, el desarrollo del procesamiento de los combustibles fósiles (principalmente petróleo y gas natural) desencadenó el desarrollo de la industria química moderna. Actualmente hay más de 2,500 productos basados en el petróleo en los mercados, siendo la base para la fabricación de plásticos, fibras y colorantes. Se estima que el 10%, 21%, y 4% de la producción mundial de gas natural, combustibles derivados del gas natural licuados y de petróleo crudo, respectivamente, se utilizan para el desarrollo de la industria química (Danner 1999).

ribles los procesos a temperatura y presión atmosférica.

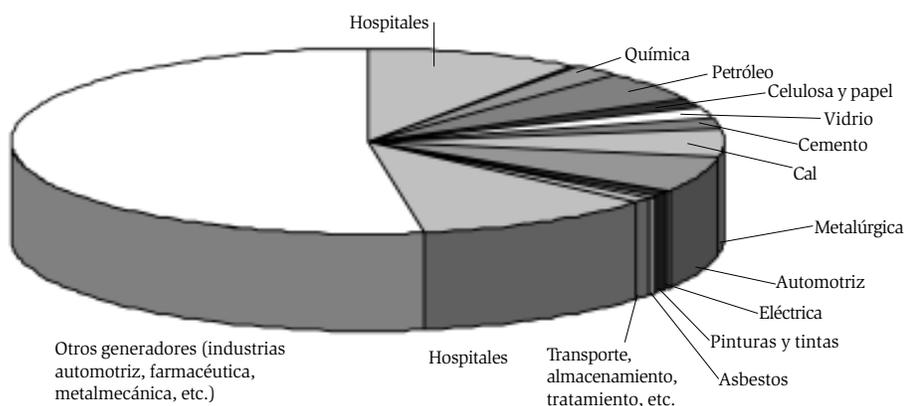
7. Las materias primas deben ser preferentemente renovables.
8. Cuando sea posible se debe evitar la derivatización innecesaria (protección/desprotección, modificaciones temporales de procesos físico-químicos, etc.).
9. El uso de catalizadores es preferible al uso estequiométrico de sustancias químicas.
10. Los productos químicos deben diseñarse para que al final de su vida útil no persistan en el ambiente y formen productos de degradación inocuos.
11. Es necesario el desarrollo de metodologías analíticas que permitan el monitoreo continuo de los procesos para verificar y controlar la formación de sustancias peligrosas.

### SITUACIÓN DE LA INDUSTRIA QUÍMICA MEXICANA

Para el año 1999 se estimó una generación de 3,328,045.28 toneladas anuales de residuos peligrosos (gráfica 2) provenientes de la industria química mexicana, y se calculó la existencia de un universo potencial de 100,000 empresas generadoras.

La producción de la industria química mexicana durante el período 2001-2002 ha sufrido una reducción en cuanto a la cantidad de producción (cuadro 1) por los problemas económicos que se desarrollaron a nivel mundial. Sin embargo, y analizando su consumo (cuadro 2) se observa que existe una diferencia de aproximadamente 3,000,000 de toneladas entre las materias utilizadas y el producto final, lo cual nos indica que los procesos utilizados aún tienen posibilidades de adecuarse para hacer un mejor aprovechamiento de los

GRÁFICA 2. PROPORCIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS GENERADOS POR SECTOR INDUSTRIAL (1999)



Fuente: SEMARNAT 1999.

recursos y obtener mayores beneficios con el menor consumo y generación de residuos. Por esto, es necesario trabajar en conjunto con grupos industriales, la academia y ONG para la modernización de los procesos y el desarrollo de nuevas sustancias que involucren menos gastos para su gestión ambiental.

#### AVANCES EN EL DESARROLLO DE LA QUÍMICA VERDE EN MÉXICO

En México se han realizado diversas actividades para el desarrollo de tecnología, así como para la optimización de procesos mediante el uso de sustancias químicas amigables con el ambiente, tanto por instituciones de investigación públicas o privadas, motivadas principalmente por incentivos económicos a través de los programas del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

En el sector industrial también se han desarrollado programas para la mejora de procesos o sustitución de sustancias peligrosas, con la finalidad de reducir la generación de residuos peligrosos, mejorar el rendimiento de los procesos, y eliminar gastos por el manejo de residuos y optimizar el consumo de materias primas.

De los principales esfuerzos realizados en México cabe destacar los siguientes:

#### CENTRO MEXICANO DE QUÍMICA EN MICROESCALA

El Centro Mexicano de Química en Microescala de la Universidad Iberoamericana en la categoría de Capítulo Afiliado al *Green Chemistry Institute*, impartió el primer taller de química verde en México en julio del 2003. Sus principales actividades están relacionadas con la capacitación y desde 1990 con promover en México y en otros países el uso de técnicas de laboratorio en microescala (usando cantidades de micro/mililitros y miligramos) (CMQM 2004).

#### MESA REDONDA PARA LA PREVENCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN MÉXICO/CENTRO MEXICANO PARA LA PRODUCCIÓN MAS LIMPIA

Una de las formas más exitosas para promover la introducción de estrategias de prevención de la contaminación en la gestión ambiental, así como de sus prácticas en las actividades económicas de los países ha sido, sin lugar a dudas, la organización de mesas

CUADRO 1. PRODUCCIÓN DE LA INDUSTRIA  
QUÍMICA MEXICANA (TON)

SECTOR	2001	2002	% 02/01
Fertilizantes	283,341	234,402	-17.27
Fibras artificiales y sintéticas	566,497	526,196	-7.11
Hules sintéticos y Negro de Humo	252,384	251,317	-0.42
Inorgánicos básicos	5,838,229	5,823,210	-0.26
Petroquímicos PEMEX	6,969,166	6,155,710	-11.67
Otros petroquímicos	2,093,070	2,230,151	6.55
Resinas sintéticas	2,436,478	2,376,948	-2.44
Total	18,439,165	17,597,933	-4.56

Fuente: ANIQ 2004.

CUADRO 2. CONSUMO APARENTE DE MATERIALES EN  
LA INDUSTRIA QUÍMICA MEXICANA (TON)

Sector	2001	2002	% 02/01
Fertilizantes	819,649	896,186	-8.54
Fibras artificiales y sintéticas	431,640	456,164	-5.38
Hules sintéticos y Negro de Humo	150,737	151,979	-0.82
Inorgánicos básicos	5,161,334	5,179,950	-0.36
Petroquímicos PEMEX	8,686,924	8,978,151	-3.24
Otros petroquímicos	2,121,659	2,095,276	1.26
Resinas sintéticas	3,896,665	3,323,499	17.25
Total	21,268,607	21,081,205	0.89

Fuente: ANIQ 2004.

redondas de prevención de la contaminación (MRPCM 2004).

La Mesa Redonda de Prevención de la Contaminación en México (MRPCM) es una organización que difunde y promueve el concepto de PC, objetivos,

estrategias, acciones, herramientas y beneficios de la implantación de la PC en el sector industrial y de servicios, por medio de la vinculación y trabajo conjunto de estos y otros sectores involucrados como el académico, de investigación, de consultoría, gubernamental, no gubernamental y financiero, con el fin de lograr un desarrollo sustentable en México. Así mismo busca establecer un vínculo a mediano plazo con las mesas redondas de los Estados Unidos y Canadá, lo cual permitirá en un futuro cercano, avances y mejoras en la situación ambiental de la región de América del Norte (MRPCM 2004).

En este marco se establecieron cinco grupos de trabajo integrados por personas de los ámbitos académico, gubernamental, industrial y de servicios, entre otros, quienes trabajan en conjunto con las instituciones participantes para cumplir los objetivos de la Mesa Redonda.

Como parte del programa que ejecutó el Grupo de trabajo No. 1 se realizó la compilación de la información, análisis y edición del catálogo de 68 casos exitosos de prevención de la contaminación en México, donde se implantaron medidas de reciclaje de sustancias y materiales, sustitución de sustancias por otras de menor peligrosidad, instalación de equipos de control y aplicación de buenas prácticas de ingeniería.

#### OTROS SITIOS

Basándose en investigaciones de campo así como en la base de datos de investigadores del CONACYT, se identificaron los siguientes centros que realizan investigación y desarrollo de tecnología dentro de los cuales se han llevado a cabo algunos trabajos que involucran las prácticas de química verde (véase cuadro 3).

En el el Colegio de la Frontera Norte, A.C. se realiza investigación formal sobre química verde para la solución de diversos problemas ambientales.

CUADRO 3. CAPACIDAD DE INVESTIGACIÓN SOBRE QUÍMICA VERDE

INSTITUCIÓN	CANTIDAD DE INVESTIGADORES	%
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla	2	1.8
Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.	1	0.9
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.	2	1.8
Centro de Investigación en Química Aplicada	1	0.9
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN	4	3.5
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.	3	2.7
Colegio de Postgraduados	6	5.3
Dirección General de Institutos Tecnológicos	3	2.7
El Colegio de la Frontera Sur	2	1.8
Instituto de Ecología, A.C.	3	2.7
Instituto Mexicano del Petróleo	1	0.9
Instituto Nacional de la Pesca	1	0.9
Instituto Nacional de Salud Pública	1	0.9
Instituto Politécnico Nacional	1	0.9
Instituto Tecnológico de Sonora	1	0.9
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec	1	0.9
Universidad Autónoma Chapingo	4	3.5
Universidad Autónoma de Baja California	4	3.5
Universidad Autónoma de Baja California Sur	1	0.9
Universidad Autónoma de Campeche	1	0.9
Universidad Autónoma de Chiapas	1	0.9
Universidad Autónoma de Coahuila	1	0.9
Universidad Autónoma de Nuevo León	8	7.1
Universidad Autónoma de San Luis Potosí	5	4.4
Universidad Autónoma de Yucatán	2	1.8
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo	1	0.9
Universidad Autónoma del Estado de México	6	5.3
Universidad Autónoma del Estado de Morelos	1	0.9
Universidad Autónoma Metropolitana	8	7.1
Universidad de Guadalajara	2	1.8
Universidad de Guanajuato	1	0.9
Universidad de las Américas-Puebla	2	1.8
Universidad Iberoamericana	1	0.9
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo	3	2.7
Universidad Nacional Autónoma de México	26	23.0
Universidad Veracruzana	2	1.8
<i>Total</i>	<i>113</i>	<i>100.0</i>

Fuente: CONACYT 2004.

## CONCLUSIONES

La química verde esta basada en la mejora continua, la innovación y el desarrollo de tecnología, lo cual abre una amplia gama de posibilidades para empatar tanto los objetivos ambientales como los de negocio en las empresas modernas.

En México, el desarrollo de la química verde se basa en los reducidos apoyos que se otorgan a las instituciones de investigación de las universidades y centros independientes de investigación. Sin embargo, no se tiene una verdadera sinergia entre la industria “como usuario final” y la academia “como desarrollador de tecnología”. En general, las actividades de prevención de la contaminación están centradas en el cumplimiento de la normatividad, sin existir en muchos casos una verdadera conciencia sobre la problemática a la que nos enfrentamos.

En empresas transnacionales, la mejora de los procesos se ha venido dando por directrices corporativas más que por una verdadera preocupación por la mejora del medio ambiente y el uso sustentable de los recursos.

Es necesario fomentar la investigación para el desarrollo de nuevas sustancias y procesos ambientalmente amigables, y que vayan de acuerdo con la problemática nacional, por lo que es fundamental la participación de organismos del gobierno federal, como el INE y el CONACYT para comenzar a encaminar los esfuerzos que se han estado realizando principalmente en la academia.

## AGRADECIMIENTOS

A la Mesa Redonda para la Prevención de la Contaminación en México, a la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su valiosa ayuda para la obtención de información.

## BIBLIOGRAFÍA

- Anastas, P.T. 1998. *Green chemistry, theory and practice*. Oxford University Press, New York.
- ANIQ (Asociación Nacional de la Industria Química) 2004. Cifras definitivas. Producción/Consumo aparente. [www.aniq.org.mx/aniq/aniq.htm](http://www.aniq.org.mx/aniq/aniq.htm).
- Clark, J.H. 1999. Green chemistry: challenges and opportunities. *Journal of Green Chemistry* 1(1): 1-8.
- CMQM 2004. Centro Mexicano de Química de Microescala. [www.uia.mx/ibero/noticias/nuestracom/00/nc72/9.html](http://www.uia.mx/ibero/noticias/nuestracom/00/nc72/9.html). Consultado en abril de 2004.
- CONACYT 2004. Líneas de investigación. [www.conacyt.mx/dagci/lineas.html](http://www.conacyt.mx/dagci/lineas.html). Consultado en abril de 2004.
- Danner, H. 1999. Biotechnology for the production of commodity chemicals from biomass. *Chemical Society Review* 28: 395-405.
- EPA 1998. Folleto de información sobre la química verde. EPA Home. Prevention, Pesticides & Toxic Substances. Pollution Prevention and Toxics. Green Chemistry. What Is Green Chemistry? [www.epa.gov/green-chemistry/whats\\_gc.html](http://www.epa.gov/green-chemistry/whats_gc.html). Consultado en: abril del 2004.
- Graedel, T. 1999. Green chemistry in an industrial ecology context. *Journal of Green Chemistry* 1(5): G126-G128.
- McDonough, W. 1998. The next industrial revolution. *The Atlantic Monthly* 282(4): 82-92.
- MRPCM 2004. Mesa Redonda para la Prevención de la Contaminación en México. Casos de éxito. [www.pcmexico.org/mrpcespanol/casos/doctos/casos.html](http://www.pcmexico.org/mrpcespanol/casos/doctos/casos.html). Consultado en abril de 2004.
- SEMARNAT 2004. Volumen de residuos peligrosos generados. [www.semarnat.gob.mx/wps/portal/.cmd/cs/.ce/155/.s/4822/\\_lpid.1386/1611/\\_th/902/\\_lp.1386/0/\\_s.155/4819](http://www.semarnat.gob.mx/wps/portal/.cmd/cs/.ce/155/.s/4822/_lpid.1386/1611/_th/902/_lp.1386/0/_s.155/4819). Consultado en abril de 2004.

---

**Mario Yarto Ramírez.** Director de Investigación sobre sustancias químicas y riesgos ecotoxicológicos. INE. Correo-e: [myarto@ine.gob.mx](mailto:myarto@ine.gob.mx).  
**Arturo Gavilán García.** Jefe de departamento de Estudios de análisis comparativos de riesgo ambiental. INE. Correo-e: [agavilan@ine.gob.mx](mailto:agavilan@ine.gob.mx).  
**José Castro Díaz.** Subdirector de Estudios sobre sustancias químicas. INE. Correo-e: [jdcastro@ine.gob.mx](mailto:jdcastro@ine.gob.mx)