

DAVID CONTRA GOLIAT:

La nanotecnología en la limpieza del ambiente

Carrillo-González, R.^{1,3}; González-Chávez, M.C.A.^{1,3}; López-Luna, J.^{2,3}

¹Programa de Edafología *Campus* Montecillo Colegio de Postgraduados, km 36.5 Carretera México-Texcoco. Texcoco, México. 56230.

²Universidad de la Sierra Juárez, Instituto de Estudios Ambientales, Av. Universidad s/n Carr. Guelatao-Ixtlán. Ixtlán de Juárez, Oaxaca. C.P. 68725.

³LPI 16 Innovación Tecnológica.

Autor responsable: crogelio@colpos.mx

RESUMEN

En el contexto de la situación ambiental que se vive en la actualidad, se discuten brevemente aplicaciones de mayor factibilidad de materiales nanoestructurados, la catálisis y reducción química inducidas por nanocompositos, así como la adsorción en nanoestructuras. Se omiten otras posibles aplicaciones recientemente sugeridas en el ámbito preventivo y de remediación ambiental, dejando pendiente las implicaciones éticas, y toxicológicas que puede derivarse de la aplicación de la nano ingeniería.

Palabras clave: nanopartículas, nanocompositos, nanobiocidas, catálisis.

INTRODUCCIÓN

La nanociencia es una disciplina que en sus primeros años se ha enfocado a descubrir, caracterizar y modelar los materiales y fenómenos a escala nanométrica (Diallo *et al.*, 2011). De este conocimiento derivó la nanotecnología o la manipulación de la materia a escala nano, cuyos primeros desarrollos se enfocaron en áreas de rápido retorno económico, como la electrónica y los materiales. Más recientemente se ha diversificado su uso, así como su aplicación a la solución de problemas ambientales; sin embargo, la implementación en la vida cotidiana no sólo depende de la posibilidad de bajar su costo, sino que también debe considerar su sostenibilidad. Dentro de las posibles aplicaciones de los productos con base en nanomateriales, se han incluido la protección y limpieza del ambiente, y las implicaciones de la miniaturización se reflejan en la reducción de la materia prima y el consumo de energía; por ejemplo, se estima que esto último se puede reducir hasta 10% por uso de la nanotecnología y, con ello, la emisión de bióxido de carbono (Masciangioli y Zhang, 2003), lo cual se puede traducir en disminución de la contaminación lo que, a su vez, se refleja en incremento de las posibilidades de reciclaje debido al uso más eficiente y consideración de materiales menos tóxicos y agentes renovables.

La problemática actual del ambiente

Las actividades del hombre para satisfacer la demanda de alimentos y servicios de nuestra población, han llevado varios procesos al límite. Lo anterior coloca a la humanidad ante posibles catástrofes con consecuencias directas. Entre los procesos que se consideran fuertemente alterados, de acuerdo con Rockström *et al.* (2009), se incluyen el cambio de clima, pérdida de biodiversidad, alteración en los ciclos de nitrógeno y fósforo, disminución del ozono estratosférico, acidificación de océanos, demanda de agua, cambio de uso de suelo, carga de aerosoles, y contaminación. El Cuadro 1 muestra la unidad del indicador representativo de la modificación donde, por ejemplo, la concentración del bióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera es el indicador que se relaciona con el cambio de clima. Su concentración antes de la era industrial era de aproximadamente 280 ppm,

pero desde el inicio de ésta se incrementó y en la actualidad es de 396 ppm (Tans, 2013), y la concentración meta que se esperaría alcanzar para que el proceso no continúe es de 350 ppm.

La alteración de los ciclos del nitrógeno y fósforo es otro caso en el cual el hombre ha contribuido fuertemente. Lo mismo ha ocurrido con la disminución de la capa de ozono estratosférico y, para mitigar estos efectos, es importante la intervención humana con tecnología nueva para poder alcanzar los valores establecidos como meta. De igual forma, la acidificación de los océanos se relaciona con la emisión de CO₂, por lo que la reducción de sus emisiones o captura son clave para mitigar este fenómeno. Otro caso es el consumo de agua dulce por año, que se estima fue de 450 km³. Actualmente es de 2600 km³, donde se incluye el agua potable, de uso agrícola, y la que retorna como agua residual, la cual es vertida a ríos y descargada al mar.

En el caso de la contaminación se reconocen serios problemas, debido a la descarga de compuestos orgánicos e inorgánicos al agua y los suelos. No es posible tener un indicador de la situación preindustrial presente y la meta que nos garantice la sostenibilidad de los recursos. Lo que sí se sabe es que antes de 1940 no había plaguicidas vertidos al agua y al suelo, y que sólo las personas que habitaban alrededor de minas se exponían crónicamente a metales; sin embargo, ahora la exposición se ha incrementado a poblaciones humanas de áreas industriales y ciudades e, incluso, las rutas de exposición a estos elementos se han diversificado y multiplicado en todos los sitios donde el estilo de vida humano está basado en el consumo. Lo anterior tiene como consecuencia la reducción de la calidad de vida (Glaeser, 2011).

Uso de materiales nanométricos para remediar la contaminación

El uso de instrumentos y materiales con componentes de tamaño nanométrico pueden contribuir a la reducción del consumo de materia prima y energía y, a la postre, abatir la emisión de gases con efecto invernadero. De acuerdo con la información de los Estados Unidos de América (EUA), la miniaturización redujo el consumo de materia prima y energía en 2011. El uso de fertilizantes en forma de compuestos nanoestructurados incrementa la eficiencia de su absorción y reduce las dosis aplicadas de nitrógeno (Ledezma, 2012) y fósforo para la producción de cultivos. Lo anterior

Cuadro 1. Procesos, indicadores y alteraciones ambientales por actividades humanas.

Proceso	Parámetro indicador	Valor		
		preindustrial	Presente	Meta
Cambio de clima	Concentración atmosférica del CO ₂ (mg kg ⁻¹)	280	396	350
	Radiación forzada (w m ²⁻¹)	0	1.5	1
Pérdida de biodiversidad	Tasa o velocidad de extinción de especies (número de especies por millón de especies por año)	0.1-1	>100	10
Ciclo del nitrógeno	Cantidad de N ₂ removido de la atmósfera por el hombre (millones de t año ⁻¹)	0	121	35
Ciclo del fósforo	Cantidad de fósforo arrojado a los sedimentos (millones de t año ⁻¹)	-1	8.5-9.5	11
Disminución de ozono estratosférico	Concentración de ozono (Unidades Dbson)	290	283	276
Acidificación de los océanos	Promedio global de estado de saturación de aragonita en agua superficial	3.44	2.90	2.75
Demanda global de agua dulce	Consumo de agua dulce por humanos (km ³ año ⁻¹)	415	2 600	4 000
Cambio de uso del suelo	Porcentaje global de cubierta vegetal y cultivos	Bajo	11.7	15
Carga de aerosoles en la atmósfera	Concentración de partículas en atmósfera, c/base regional	No registrado		
Contaminación química	Cantidad emitida o concentrada de contaminantes orgánicos, metales pesados, isotopos.	0 (mg kg ⁻¹ de compuestos orgánicos sintéticos)	Por determinar depende la especie química	

Adaptado de Diallo *et al.* (2011).

contribuiría a abatir la alteración de los ciclos de nitrógeno y fósforo, y reducir la cantidad de este último, descargado en los sedimentos. Por ello, la elaboración de materiales de tamaño nanométrico pueden permitir el reciclado de materiales y el uso más eficiente de la materia prima.

Respecto a los problemas de contaminación, se han identificado varios materiales con aplicaciones a favor de la sostenibilidad de algunos procesos y la depuración o protección del ambiente, aprovechando la reactividad de los compuestos de tamaño nanométrico. Es importante señalar que la investigación se ha enfocado a problemas de contaminación del agua, pero hay algunos análisis para

su uso en suelo (Cundy *et al.*, 2008), y a la fecha se pueden agrupar en cinco posibles formas, pero podría haber otras posibilidades de aplicación.

Nanosorbentes

Materiales con alta capacidad y selectividad para remover cationes, aniones y compuestos orgánicos del agua contaminada. En éstos se incluyen nanoarcillas, nanopartículas de óxidos de metales (Figura 1 A), y materiales porosos nanoestructurados de titanio, silicio o aluminio (Han, 2007); por ejemplo, zeolitas, compuestos cristalinos, porosos de aluminio y silicio con estructuras bien definidas, se usan para separación y catálisis. Las zeolitas nanoporosas (de 10 a 100 nm) pueden utilizarse para oxidar

selectivamente hidrocarburos, como el tolueno y benzaldehído (Figura 1 B). Las ventajas de su uso son que la oxidación ocurre con luz visible, lo que reduce el consumo de energía y la producción de compuestos secundarios. Otros materiales absorbentes son las fibras de carbono y los absorbentes poliméricos nanoporosos. Estos últimos retienen contaminantes y se pueden aplicar a soluciones acuosas e, incluso, para retener el CO₂ de los escapes de los autos (Gottschalk *et al.*, 2011).

Compositos

Con propiedades magnéticas como la magnetita, maghemita y jacobsita, pueden atrapar cromo (VI) sobre su estructura y removerlo del agua (Niu

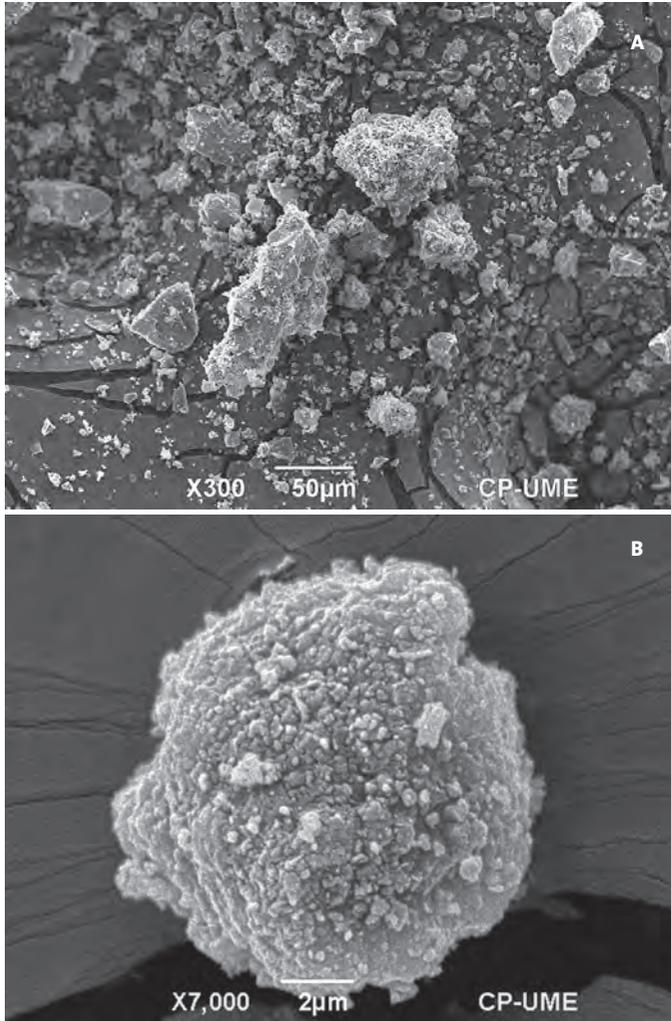


Figura 1. A: Ferrihidrita sintética porosa. B: Aglomerado de zeolita natural. Microfotografías de microscopio electrónico de barrido. 300X y 7000X, respectivamente.

o inducir otras reacciones que disminuyen la actividad del compuesto. En este grupo se incluye al dióxido de titanio (TiO_2) que puede ser activado con luz visible (fotocatalítico). El cambio del estado de oxidación de algunos elementos es suficiente para reducir su toxicidad. Las partículas metálicas con valencia cero, como el hierro, se consideran como excelentes donadores de electrones, por lo que pueden oxidar materiales a su alrededor, independientemente de

et al., 2005); además, también sirven para quitar algunos compuestos aromáticos (Cundy *et al.*, 2008). Figuras 2A y 2B: partículas de oro para remover mercurio del agua residual (Anshup y Pradeep, 2009). Esta posibilidad es muy importante si se considera la alta movilidad del mercurio, la cual dificulta quitarlo del ambiente, pues pasa con mucha facilidad del suelo o agua a la atmósfera.

Nanocatálisis y nanopartículas redox activas

Éstas pueden convertir solutos orgánicos tóxicos u oxianiones en productos inocuos. Se entiende por catálisis la aceleración de la velocidad con que ocurren las reacciones químicas por efecto de un catalizador. Algunas nanopartículas se pueden usar para acelerar la oxidación de compuestos

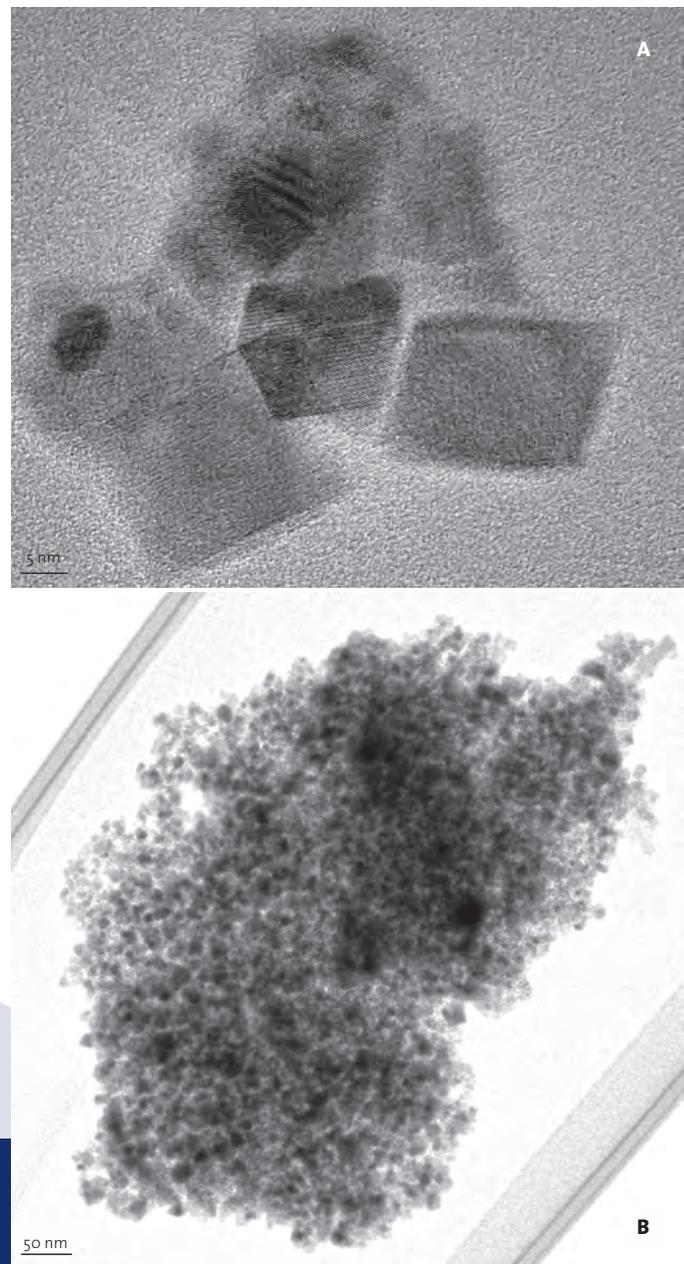


Figura 2. A: Aglomerado de nanopartículas de óxido de hierro Fe_3O_4 . B: Nanopartículas de óxido de hierro Fe_3O_4 (Foto: J. López).

su tamaño. Esta capacidad reactiva se puede aprovechar para oxidar compuestos estables de cloro (R-Cl), como hexaclorociclohexano, usualmente tóxicos (Zhang y Elliott, 2006).

Nanopartículas de hierro (Fe)

Otros metales con valencia cero también oxidan compuestos orgánicos, como el tricloroetileno (Figura 1 A). Diversos compuestos de hierro, como las partículas bimetalicas, entre las que están hierro/paladio, hierro/platino, hierro/plata, hierro/níquel, y hierro/cobalto, pueden oxidar compuestos, como tetracloruro de carbono, crisoidina, cloroformo, diclorometano, hexaclorobenzeno, tetraclorobenzeno, diclorobromometano, diclorobenzeno, tetracloroetano, DDT, TNT, lindano, y sus productos de reacción (Savage *et al.*, 2009); la proporción de material removido puede ser mayor a 60% (Cundy *et al.*, 2008).

Nanobiocidas

Pueden desactivar bacterias en agua contaminada, sin generar productos secundarios tóxicos. Entre estos materiales se incluyen nanopartículas de óxidos de magnesio, titanio, cobre, hierro, zinc, aluminio, silicio, cerio, plata y dendrímeros bioactivos (Dinesh *et al.*, 2012). Las partículas con propiedades desinfectantes pueden fijarse sobre fibra de vidrio o polímeros, sobre las que se hace pasar agua para desinfectarla (Nangmenyi, 2009).

Filtros y membranas nanoestructurados para tratamiento de agua y desalinización

Se incluyen fibras de nanotubos de carbono, mismos que pueden usarse para remover bacterias y virus. Los materiales para ósmosis inversa para tratamiento de agua dura son membranas con tamaño de poro de 0.2 a 4 nm; pueden usarse para remover

microorganismos o iones de calcio, magnesio y sodio del agua (Srivastava *et al.*, 2004). Estos materiales son eficientes y de menor costo (Cuadro 2). Las membranas de nanotubos se pueden usar para remover bacterias del agua; estos filtros se pueden regenerar por esterilización en autoclave o por ultrasonificación. Las membranas que aumentan el flujo del agua están compuestas con zeolitas, membranas poliméricas nanofibras con alta eficiencia de separación y flujo de agua. Sistemas de filtración con base en nanopartículas y accesorios que incluyen dendrímeros, los que mejoran los sistemas de filtración y de nanofluidos de desalinización de agua (Gottschalk *et al.*, 2011).

Algunos nano-alambres de óxido de manganeso y potasio pueden ser usados para recoger petróleo y sus derivados derramados en el agua con mayor eficiencia, debido a que tienen la capacidad de absorber 20 veces más que los absorbentes comúnmente usados y al calentarlos desprenden el aceite atrapado, por lo que pueden reusarse (Rees *et al.*, 1999).

Nanosensores

Previo a la descontaminación, es necesaria la detección precisa de los contaminantes en el suelo o el agua.

Para este fin, se tiene la posibilidad de aplicar la nanotecnología en sensores y detección de la contaminación para mejorar la sensibilidad de las técnicas de identificación de contaminantes y reducir los costos del análisis (Pacioni y Veglia, 2007). Hay diferentes sensores que se pueden usar como los biosensores, para detectar componentes orgánicos como fenol, ácido fenoxiacético, y compuestos aromáticos, halogenados y volátiles (Ikariyama *et al.*, 1993, Pacioni y Veglia, 2007). Los sensores electroquímicos en estado sólido son útiles para detectar gases (Baruah y Dutta, 2009). Los nanosensores se pueden elaborar con Fe_3O_4 cubiertos con oro y una capa de citrato, y pueden detectar uranio (Banerjee *et al.*, 2009).

Se requieren instrumentos para la detección remota *in situ* y para observación continua en tiempo real y para bajas concentraciones. En el caso de los nanotubos, su rápida respuesta a la presencia de gases a temperatura ambiente y alta sensibilidad, puede aprovecharse para la detección de gases contaminantes (Masciangioli y Zhang, 2003).

CONCLUSIONES

La información disponible a la fecha muestra que el uso de materiales con tamaño nanométrico pueden ser muy útiles

Cuadro 2. Ejemplos de materiales con constituyentes nanométricos usados para la limpieza de aguas con diferentes contaminantes que pueden removerse.

Material	Contaminante
Zeolitas nanocristalinas	Tolueno, dióxido de nitrógeno
Nanomateriales carbonáceos: filtros de carbón activado, CeO_2 , nanotubos de carbono	Benzeno, tolueno, xileno, etilbenzeno
Soportes nanoporosos autoestructurados	Iones y metales pesados
TiO_2 en nanotubos	Tolueno

Zhang *et al.* (2009); Savage *et al.* (2009).

y eficientes para reducir ciertos problemas ambientales. Algunos de ellos ya se usan a nivel comercial, mientras que otros están en la fase de escalamiento o investigación, pero se espera que se apliquen pronto. Aunado a los beneficios del uso de materiales e instrumentos que lleven partículas de tamaño nanométrico, prevalece el debate sobre sus efectos secundarios, pues pueden ser muy reactivos, y tener también efectos dañinos sobre las células. Bajo este razonamiento debe aplicarse el principio de seguridad para su estudio y aplicación a escala comercial; es decir, previo a su aplicación directa se deben rastrear sus efectos toxicológicos para el ser humano y el ambiente.

LITERATURA CITADA

- Anshup K. P. L., Pradeep T. 2009. Towards a practical solution for removing inorganic Mercury from drinking water using gold nanoparticles. *Gold Bulletin* 42: 144-151.
- Banerjee R., Katsenovich Y., Naja G.M. Li C. 2009. Using nano-sensors in environmental radionuclide monitoring. *IFMBE Proceedings* 24: 197-198.
- Baruah S., Dutta J. 2009. Applications in pollution sensing and degradation. *Environ Chem. Lett.* 7: 191-204.
- Cundy A.B, Hopkinson L., Whitby R.L.D. 2008. Use of iron based technologies in contaminated land and groundwater remediation: A review. *Sci. Total Environ.* 400: 42-51.
- Diallo M., Brinker C.J., Nel A., Shannon M., Savage N., Scott N., Murday J. 2011. Nanotechnology for sustainability: environment, water, food, minerals and climate. *In: Roco MC, C Mirkin, M Hersham.* (eds) nanotechnology research directions for societal needs in 2020: retrospective and look. *Science Policy Reports.* Springer pp: 221-259.
- Dinesh R., Anandaraj M., Srinivasan V., Hamza S. 2012. Engineering nanoparticles in the soil and their potential implications to microbial activity. *Geoderma* 173-174: 19-27.
- Glaeser E. 2011. Cities, productivity, and quality of life. *Science* 333: 592-593.
- Gottschalk F., Ort C., Scholz R.W. Nowack B. 2011. Engineered nanomaterials in rivers- Exposure scenarios for Switzerland at high spatial and temporal resolution. *Environ. Poll.* 159: 3439-3445.
- Han D. 2007. Arsenic removal by novel nanoporous adsorbents- kinetics, equilibrium and regenerability. Report. Environmental and water Resources Division, Texas A&M University.
- Ikariyama Y., Nishiguchi S., Kobatake E., Aizawa M., Tsuda M., Nakazawa T. 1993. Luminescent biomonitors of benzene derivatives in the environment using recombinant *Escherichia coli*. *Sens Actuators B.* 13: 169-173.
- Ledezma D.A. 2012. Síntesis y efecto de nanoesferas que contienen urea en cultivo hidropónico de lechuga (*Lactuca sativa*). Tesis de MC. CICATA IPN. México.
- Masciangioli T., Zhang Q.X. 2003. Environmental Technologies at the nanoscale. *Environ. Sci. Tech.* 37: 102-108.
- Nangmenyi G., Yue Z., Mehrabi S., Mintz E., Economy J. 2009. Synthesis and characterization of silver-nanoparticle-impregnated fiberglass and utility in water disinfection. *Nanotech.* 20(49). Doi:10.1088/0957-4484/20/49/495705.
- Niu S., Liu Y., Xu X., Lou Z. 2005. Removal of hexavalent chromium from aqueous by iron nanoparticles. *J Zhejiang Univ. Sci. B.* 6: 1022-1027.
- Pacioni N.L., Veglia A.V. 2007. Determination of poorly fluorescent carbamate pesticides in water, bendiocarb and promecarb, using cyclodextrin nanocavities and related media. *Analytica chimica Acta* 583: 63-71.
- Rees G.D., Evans-Gowing R., Hammond S.J., Robinson B.H. 1999. Formation and morphology of calcium sulfate nanoparticles and nanowires in water in oil microemulsions. *Langmuir.* 15: 1993-2002.
- Rockström J., Steffen W., Noone K., Persson A., Chapin F.S., Lambin E.F., Lenton T.M., Scheffer M., Folker C., Schellnhuber H.J., Nykvist B., de Wit C.A., Hughes T., van der Leeuw S., Rodhe H., Sörlin S., Snyder P.K., Costanza R., Svedin U., Falkenmark M., Karlberg L., Corell R.W., Fabry V.J., Hansen J., Walker B., Liverman D., Richardson K., Crutzen P., Foley J.A. 2009. A safe operating space for humanity. *Nature* 461: 472-475.
- Savage N., Diallo M., Duncan J., Street A. Sustich R. 2009. Nanotechnology applications for clean water. *William Andrew.* NY. USA. pp. 700.
- Srivastava A., Srivastava O.N., Talapatra S., Vajtai R., Ajayan P.M. 2004. Carbon nanotube filters. *Nat. Mater.* 3: 610-614.
- Tans P. 2013. Trends in atmospheric carbon dioxide, Recent Mauna Loa Data. In: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Zhang W., Elliott D.W. 2006. Application of iron nanoparticles for groundwater remediation. *Interscience.* DOI:10.1002/rem.20078.
- Zhang J., Yu D., Chen W., Xie Y., Wan W., Liang H., Min C. 2009. Preparation of Poly(styrene-glucidylmethacrylate)/FeO₄ composite microspheres with high magnetic contents. *J. Magnetism magnetic mat.* 321: 572-577.

