

## DESARROLLO DE LOS ÓXIDOS DE HIERRO EN LA NANOTECNOLOGÍA

M. A. García-Lobato, Arturo I. Martínez, R. G. Ruiz-Moreno

### Introducción

Los metales tienen gran importancia en todos los ámbitos de la sociedad, entre ellos sobresale el hierro y sus aleaciones, esto representa el 90 % de la producción mundial de metales. Se considera como el cuarto más abundante en la corteza terrestre y el segundo metal después del aluminio, además es barato y reciclable. Dada su importancia, dio nombre a un periodo histórico, la Edad de Hierro, a partir de esta época se han extendido sus aplicaciones.

El hierro es el metal más significativo para la actividad humana debido a que se emplea en multitud de aplicaciones, tales como sus aleaciones derivadas, p.e. producción de hierro colado y acero. En torno a este metal se eleva una serie de industrias destinadas a su extracción y transformación, y a la fabricación de herramientas, maquinaria pesada y estructuras. Su importancia en la economía mundial es significativa y la industria relacionada es el motor de los países más industrializados. Los principales productores son Rusia, Brasil, China, India, Australia, Estados Unidos y Canadá.

De manera industrial sólo resulta rentable extraerlo de los minerales que tienen una mayor concentración de Fe, como la limonita ( $\text{FeO}(\text{OH})\cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), la siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y el oligisto sobre todo una de sus variedades, la hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ). La aleaciones de Fe cuando están al contacto con ambientes húmedos y/o corrosivos se forman capas indeseables de óxidos que van degradando el material hasta fragilizarlo y fracturarlo, provocando grandes pérdidas en la industria (ver figura 1).

A pesar de los efectos indeseables de los óxidos de hierro ( $\text{Fe}_x\text{O}_y$ ), existe una gran cantidad de aplicaciones de éstos, incluso se han empleado desde la prehistoria como pigmentos para cosméticos y pinturas rupestres. A partir de la revolución industrial, las aplicaciones de los óxidos de hierro se han incrementado, desde la fabricación de pigmentos, hasta el desarrollo de materiales magnéticos para almacenamiento de datos. En la actualidad las aplicaciones de los  $\text{Fe}_x\text{O}_y$  han crecido exponencialmente, debido a

que con una disminución en el tamaño a escalas nanométricas, se pueden modificar sus propiedades y ajustarlas según la aplicación a la que estén destinados.

La relación que existe actualmente entre las empresas, el gobierno, la sociedad y los científicos, han dado como fruto nuevos retos para la ciencia. Entre los retos más prometedores se encuentra la nanociencia y sus aplicaciones, es decir la nanotecnología. Las actividades de los científicos que se dedican a desarrollar la nano-ciencia y -tecnología se pueden englobar en nueve grandes retos, en los que se encuentran: (1) fabricación a nanoescala, (2) diseño de nuevos materiales, (3) medicina, diagnóstico y administración de medicamentos, (4) fabricación de nanodetectores (de radiación, químicos, biológicos), (5) instrumentación y metrología a nanoescala, (6) desarrollo de dispositivos nano-electrónicos, -fotónicos y -magnéticos, (7) almacenamiento y conversión eficiente de energía, (8) robótica y nanomáquinas y (9) mejoramiento ambiental mediante procesos a nanoescala.

A pesar de la simpleza de la fórmula, i. e.  $\text{FexOy}$ , los óxidos de hierro se están estudiando con la finalidad de aplicarlos en más del 80 % de los retos nanotecnológicos mencionados anteriormente. Entre las aplicaciones se pueden mencionar el diseño de nuevos materiales como medios de grabación, vehículos de entrega de medicamentos y mecanismos de detección de tumores, sensores de gases tóxicos, fabricación de estándares para la cuantificación de elementos en bajas concentraciones, filtros solares, válvulas espintrónicas, dispositivos electrocrómicos, baterías recargables de litio, sistemas foto-electroquímicos para la generación de hidrógeno, adsorbentes de contaminantes tales como arsénico de agua potable, entre muchas otras aplicaciones. Además, existen nanopartículas de óxidos de hierro en la naturaleza; las encontradas en minerales se utilizan para estudiar variaciones del campo magnético terrestre en distintas eras geológicas; en cambio las encontradas en seres vivos tales como hormigas y palomas son útiles como medios de orientación y navegación.

De la fórmula general  $\text{FexOy}$ , donde  $x$  e  $y$  pueden tener distintos valores, se puede encontrar una rica variedad de óxidos de hierro, los cuales incluyen a los que presentan a los iones de hierro en forma de  $\text{Fe(II)}$  o  $\text{Fe(III)}$  en su estructura y otros que presentan la mezcla de las dos valencias. Además, de forma generalizada se incluyen a los oxihidróxidos en la familia de los óxidos de hierro, dando lugar a una fórmula general del

tipo FeOOH. Incluyendo esta última notación, se encuentran 16 diferentes tipos de óxidos de hierro. Las fases conocidas del tipo Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> son: hematita (α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y la fase β-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de estructura romboedra, la maghemita (γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) con estructura cúbica tipo espinela similar a la de la magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), y la fase ε-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> con estructura ortorrómbica. Además, se pueden nombrar la wustita (FeO), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, goetita (α-FeOOH), lepidocrocita (γ-FeOOH), akaganeita (β-FeOOH), entre otros.

### **Oportunidades en México del desarrollo de nanotecnología basada en óxidos de hierro**

El desarrollo de aplicaciones de nanoestructuras basadas en óxidos de hierro es una gran oportunidad para el progreso de la nanotecnología en México y en general de los países en vías de desarrollo tal como la región de Latinoamérica. Uno de los temas en los que se pueden ajustar las propiedades de los Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> a los problemas que aquejan a esta región es el control climático en edificios. Esto se puede lograr con el desarrollo de películas delgadas con espesores nanométricos para la construcción de ventanas inteligentes como una alternativa útil para el ahorro en el consumo de energía eléctrica en zonas de climas extremos, tales como en los estados del norte y sur del país. Otra oportunidad es el desarrollo de nanoestructuras útiles en la remediación de agua para consumo humano. Aunque no se deben de limitar a estas ramas; por su importancia, estas dos vertientes se tratarán brevemente en este trabajo.

Los filtros solares basados en películas delgadas son utilizados para minimizar el consumo de energía eléctrica en edificios; estos bloquean la radiación calorífica sin sacrificar la luminosidad de interiores. La mayor parte de estos filtros están basados en óxidos de indio y estaño, selenuro de cobre y nitruro de titanio, por lo cual resultan ser costosos. Debido a su bajo costo, el uso de óxidos de hierro en la construcción de filtros solares y dispositivos electrocrómicos es mucho más atractivo.

Los dispositivos electrocrómicos tienen la capacidad de modular de manera reversible el grado de transparencia mediante la aplicación de potenciales eléctricos del orden de los 1.5 V. Esta modulación del color se acompaña con una mayor reflexión del calor; esto es útil en lugares con climas cálidos porque impide que el calor proveniente del sol entre en la habitación a través de la ventana, esto incide en el ahorro de energía eléctrica

utilizada en el aire acondicionado. Por el contrario, en climas fríos, estos dispositivos evitan que el calor se fugue, porque se reflejan el calor hacia el interior, esto conlleva a la disminución de pérdidas de energía utilizada en sistemas de calefacción. Una fotografía de un dispositivo electrocrómico basado en óxidos de hierro se muestra en la figura 2.

Con respecto a la remediación de agua para consumo humano, se ha encontrado que en distintas regiones áridas y semiáridas de México, existen cuerpos de agua con altos contenidos de arsénico. El consumo humano de agua de estas fuentes, provoca el padecimiento conocido como hidroarsenismo crónico regional endémico. La alta capacidad mutagénica-teratogénica y carcinogénica del arsénico, provoca graves lesiones cutáneas y a los órganos internos de gran parte de la población mundial, la cual, según estadísticas de la Organización Mundial de la Salud (OMS), es de 40 millones de personas. En México, la población afectada asciende a más de 2 millones de habitantes, localizados principalmente en los estados de Chihuahua, Coahuila, Durango, Hidalgo, Nuevo León y Puebla.

Para la adsorción de arsénico se han utilizado gran variedad de materiales, incluyendo a los óxidos de hierro en las fases de magnetita y hematita, se ha reportado que la hematita tiene mayor capacidad de adsorción, especialmente a pH ácido. En ambientes oxidantes, la magnetita presenta una relativa inestabilidad, dando lugar a la formación de maghemita.

Cuando se utilizan minerales y micropartículas de óxidos de hierro se tienen bajos cocientes superficie/volumen y se utilizan gradientes de campo magnético altos para la separación del adsorbente; estas dos características elevan el costo de la infraestructura y el uso de mayor cantidad de material para adsorber a las especies de arsénico.

Asumiendo campos aplicados grandes, se encuentra que el tamaño crítico para la separación magnética de partículas aisladas de magnetita es de ~50 nm, este resultado se encuentra cuando se extrapolan las propiedades de cristales grandes a tamaños nanométricos. No sólo en este caso se observa que las extrapolaciones de las propiedades de cristales a nanocristales resultan inadecuadas. Esto es, se ha reportado que las nanopartículas de magnetita de ~40 nm se comportan como monodominios

magnéticos, presentan mayores susceptibilidades y surge el comportamiento superparamagnético (susceptibilidad y remanencia magnética cercanas a cero).

El bajo costo de las nanopartículas de óxidos de hierro y el empleo de campos magnéticos convencionales como método de separación hacen que su empleo sea satisfactorio en las áreas afectadas. Aunque la fabricación de estos materiales se encuentra en desarrollo en nuestro laboratorio, resultará prometedor su uso en la resolución de problemas que afectan a nuestra sociedad.

### **Bibliografía.**

A.I. Martínez, M.A. García-Lobato, D.L. Perry. Study of the properties of iron oxides nanostructures. Research in Nanotechnology Developments. A. Barrañón Editor. Nova Science, 2009 New York.

R.M. Cornell, U. Schwertmann. The iron oxides: Structure, properties, reactions, occurrences and uses, 2ª ed. Wiley-VCH, 2003 Heppenheim Alemania.

U. Schwertmann, R.M. Cornell. Iron oxides in the laboratory: Preparation and characterization, 2ª ed. Wiley-VCH, 2000 Weinheim Alemania.



Figura 1. Formación de óxidos de hierro en una estructura formada por una aleación de hierro expuesta a la atmósfera abierta, causando un deterioro irreversible.

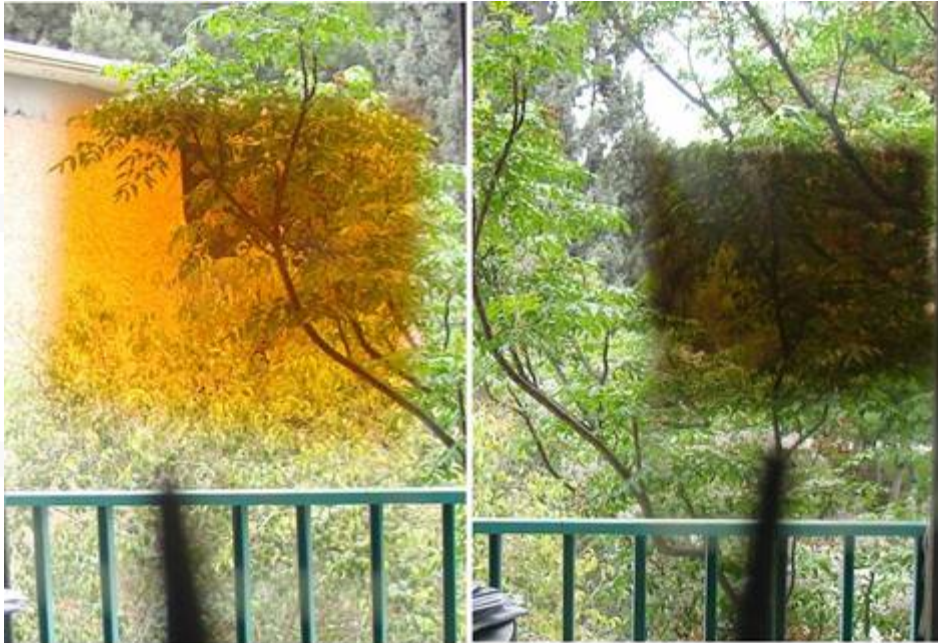


Figura 2. Fotografía de un dispositivo electrocrómico basado en óxidos de hierro. Se observa la modulación del cambio de color, antes (a) y después (b) de un ciclo electrocrómico.

---

M. A. García-Lobato, Arturo I. Martínez, R. G. Ruiz-Moreno

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional,  
Unidad Saltillo, México.