

**REDUCCIÓN DE NO CON CO EN CATALIZADORES CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>****NO REDUCTION WITH CO OVER CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> CATALYSTS**

A. Gutiérrez-Martínez y R. Pérez-Hernández\*

*Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares; Carr. México-Toluca S/N La Marquesa, Ocoyoacac, Edo. de México C. P. 52750, México.*

Recibido 24 Enero 2006; Aceptado 2 Mayo 2006

**Resumen**

Se sintetizaron soportes catalíticos por sol-gel y catalizadores por el método de impregnación clásica. Los catalizadores fueron caracterizados por técnicas diversas para determinar el área específica por adsorción de nitrógeno a temperatura de N<sub>2</sub> líquido, las fases cristalinas por DRX, la morfología por MEB, la reducción de la fase activa por TPR y la actividad catalítica de los catalizadores en la reacción de reducción del NO con CO. La adición de CeO<sub>2</sub> a la titania tiene un efecto positivo en el área específica debido a que incrementa su valor alcanzando el máximo en el óxido TiCe-50. Por DRX se identificaron fases únicas y mezcla de fases dependiendo de la razón CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>. Se observó por TPR una disminución en la temperatura de reducción del CuO conforme se enriquece con CeO<sub>2</sub> al soporte catalítico. La reactividad del catalizador CuO/CeO<sub>2</sub> en la reacción NO + CO fue mayor respecto de toda la serie de catalizadores estudiados. Este comportamiento es atribuido a la presencia de especies de cobre dispersas en el catalizador y mostrado por TPR.

*Palabras clave:* NO + CO, CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>, TPR, óxidos mixtos, sol-gel.

**Abstract**

Catalytic supports were synthesized by sol-gel method following with a classical impregnation to obtain the catalysts. Specific surface area of the samples was determined by the BET method with N<sub>2</sub> adsorption. Crystalline phases of the samples were determined by XRD and the morphology was observed by SEM. The reduction of the active phase was determined by TPR. The catalytic activity of the samples was studied by the NO reduction with CO. The addition of CeO<sub>2</sub> to titania shows a positive effect on the specific area of the catalysts until 50% of CeO<sub>2</sub> was reached. Samples showed diffractions peaks and a broad background pattern as a function of the CeO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> ratio. The reduction of CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> catalysts evidenced the existence of different kinds of CuO species and shift of the high-temperature peak to lower temperature, as a function of the enrichment of CeO<sub>2</sub> phase to TiO<sub>2</sub> phase. The reactivity of the CuO/CeO<sub>2</sub> catalyst in the NO + CO reaction was higher than the all series of studied catalysts. This behavior is attributed to the presence of the highly dispersed Cu on the catalyst as it was shown by TPR.

*Keywords:* NO + CO reaction, CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>, TPR, mixed oxides, sol-gel.

**1. Introducción**

La eliminación de NO<sub>x</sub> de emisiones contaminantes es una de las más importantes metas a cumplir para la protección del medio ambiente. Una de las reacciones de interés a seguir es la reducción catalítica de NO<sub>x</sub> por CO, considerada la reacción más fundamental en la conversión de gases contaminantes en los automóviles (Egelhoff, 1982). La reducción de NO por CO es catalizada por metales

preciosos, en particular el Rh debido a su alta actividad y selectividad es usado en el catalizador de tres vías (Funabiki y col., 1991). Debido al alto costo y disponibilidad de este metal precioso, considerable atención ha sido puesta en metales de transición y en sus óxidos como posibles sustitutos para los metales preciosos debido a su alta actividad hacia la oxidación del CO (Kummer y col., 1980, Huang y col., 1991). Catalizadores de Cu soportado han recibido mucha atención en reacciones de

\* Autor para la correspondencia: E-mail: pehr@nuclear.inin.mx  
Tel: (52-55) 53 29 72 39 Fax: (52-55) 53 29 72 40

eliminación del NO; en particular en Cu-ZSM-5 (Iwamoto y Hamada, 1991) en la reducción catalítica selectiva del NO con hidrocarburos en presencia de O<sub>2</sub> y para la descomposición del NO hacia N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>. Por otro lado, desde 1980, el CeO<sub>2</sub> ha sido ampliamente usado en la purificación de gases de escape de vehículos, el óxido de cerio mejora la dispersión de componentes activos en el catalizador, estabiliza térmicamente al soporte y tiene la habilidad de almacenar oxígeno (Yao y Yu-Yao, 1984) que puede ser utilizado en reacciones donde exista variaciones de oxígeno para mejorar la oxidación de CO e hidrocarburos y la reducción de NO<sub>x</sub> (Trovarelli y col., 1999). Los ciclos redox Ce<sup>3+</sup>/Ce<sup>4+</sup> también proporcionan actividad del CeO<sub>2</sub> en el sistema. Larsson y Andersson 1998, mostraron que el dopado de CuO/TiO<sub>2</sub> con CeO<sub>2</sub> promueve la oxidación de CO y aumenta la estabilidad del catalizador. Zhu y col., 2004, impregnaron CeO<sub>2</sub> a TiO<sub>2</sub> y encontraron el siguiente comportamiento catalítico 4Cu-6Ce-Ti < CuO/TiO<sub>2</sub> < CuO/CeO<sub>2</sub> ≈ 4Cu-40Ce-Ti en la reacción de NO con CO. Ellos sugieren que en catalizadores con alto contenido de ceria, la actividad de especies de cobre se incrementa debido a la formación de cristalitas de CeO<sub>2</sub>. Okamoto and Gotoh 1997, reportan alta actividad y selectividad en la reacción de NO-CO hacia N<sub>2</sub> a >170°C en catalizadores de Cu-Fe soportado ZrO<sub>2</sub>. En este trabajo se presenta el estudio de las propiedades catalíticas de CuO soportado en TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> con diferente razón TiO<sub>2</sub>/CeO<sub>2</sub> en la reacción NO + CO.

## 2. Experimental

TiO<sub>2</sub> y óxidos binarios TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> (50 y 70 % wt CeO<sub>2</sub>) fueron preparados por el método sol-gel, utilizando el siguiente protocolo de síntesis: se mezcló n-propanol, propóxido de titanio (para los óxidos mixtos se disolvió primero el Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>•6H<sub>2</sub>O en el n-propanol y posteriormente se adicionó el propóxido de titanio) y HNO<sub>3</sub> como catalizador. La mezcla resultante fue

hidrolizada con agua deionizada a temperatura ambiente en agitación continua. El sólido resultante fue convertido a xerogel por calentamiento a 100 °C 36 h. Los xerogeles fueron calcinados en flujo dinámico (15ml/min de aire) de temperatura ambiente a 100 °C por 1 h. Posteriormente la temperatura fue incrementada hasta 600 °C por 5 h. CeO<sub>2</sub> fue obtenido por calcinación directa del Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>•6H<sub>2</sub>O a 700 °C por 4 h. Acetato de cobre fue incorporado a los soportes por impregnación clásica a una concentración apropiada para tener 5% en peso de cobre. Los catalizadores fueron calcinados en flujo estático durante 2h a 500 °C. El área superficial (BET) se determinó en un equipo multitareas RIG-100, utilizando el método de un solo punto a temperatura de nitrógeno líquido. La identificación de las fases cristalinas de los catalizadores se determinó mediante un difractor de rayos X, SIEMENS D-5000. La morfología de los catalizadores fue analizada en un microscopio electrónico de barrido marca Phillips modelo XL-30 equipado con sonda para análisis químico elemental marca EDAX. El siguiente código fue considerado para la identificación de los catalizadores, CuTiCe-n, donde **Cu**=CuO, **Ce**=CeO<sub>2</sub>, **Ti**=TiO<sub>2</sub> y **n**= 50, 70 % en peso de CeO<sub>2</sub> en el óxido binario. Las propiedades catalíticas fueron estudiadas en la reacción NO + CO en estado estacionario en un equipo multitareas RIG-100, equipado con un reactor de lecho fijo y controladores de flujo másico, los gases de reacción fueron evaluados en un cromatógrafo de gases Gow-Mac-580. Se utilizó 0.05 g (*w*) de catalizador y un flujo total (*F*) de 100 ml/min *w/F*=0.0005 g-min/ml. La concentración de reactivos de NO y CO fue de 2500 ppm. Previo a la reacción catalítica, los catalizadores fueron activados en flujo de aire (30 ml/min) a 400 °C por 1 h.

## 3. Resultados y discusión

La Fig. 1 muestra los resultados obtenidos por la técnica de difracción de rayos X de los materiales catalíticos

CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>. Fases cristalinas anatasa, rutilo y tenorita (CuO) están presentes en el catalizador CuO/TiO<sub>2</sub>. En las muestras CuO/CeO<sub>2</sub> y CuTiCe-70 se identificó a la cerianita (fase cúbica del CeO<sub>2</sub>) y a la tenorita. En tanto que un difractograma correspondiente al de un material amorfo ó pobremente cristalino fue observado en el catalizador CuTiCe-50. En esta muestra no se observaron picos de difracción correspondientes al CuO, (Fig. 1), y puede ser atribuido a que el tamaño de partícula de los cristalitas del óxido de cobre está por debajo del límite de resolución de la técnica de rayos-X. Los resultados de área específica (S) de los materiales catalíticos (Tabla 1), muestran claramente que la titania tiene el valor de S más baja comparada con el de la ceria. Adicionalmente en el catalizador CuO/TiO<sub>2</sub> se observó por DRX el mayor grado de cristalinidad (picos de difracción estrechos y agudos) como consecuencia de un mayor sinterizado del material, resultado que pudiera explicar la baja área específica. La adición de CeO<sub>2</sub> a TiO<sub>2</sub> causó un incremento en el área superficial alcanzando el máximo en el óxido mixto cuya composición es de 50% de titania y 50% de ceria. Un efecto similar ha sido reportado por Daturi *y col.*, 1998, Pérez Hernández R., 2005, Pérez Hernández R. *y col.*, 2005, en óxidos mixtos ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> con una composición equimolar. Ellos observaron también, que entre menor grado de cristalinidad del material catalítico, mayor es el área superficial en los óxidos mixtos, resultado que está en buen acuerdo con lo observado en este trabajo. Por otro lado, la impregnación del cobre a los soportes catalíticos, causó una ligera disminución en el área específica. Este comportamiento puede ser atribuido al bloqueo de los poros del soporte por el CuO, pero la tendencia en el área superficial se mantiene. La caracterización morfológica de los catalizadores por microscopía electrónica de barrido (MEB) mostró agregados de forma y tamaño irregular (Figura no mostrada).

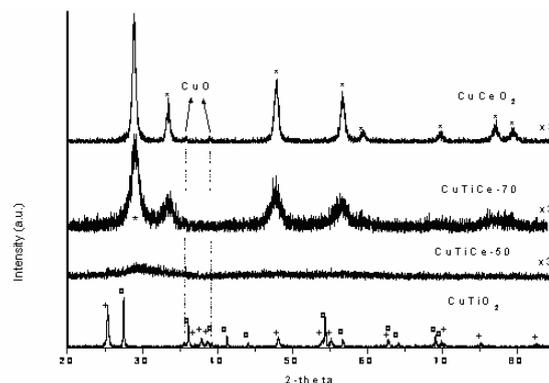


Fig. 1. Difractogramas de rayos X de catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>. [+]Anatasa (TiO<sub>2</sub>), [o]-Rutilo (TiO<sub>2</sub>) y [\*]-Cúbica (CeO<sub>2</sub>).

Tabla 1. Área superficial de soportes y catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>.

Soporte	S (m <sup>2</sup> /g)	Catalizador	S (m <sup>2</sup> /g)
TiO <sub>2</sub>	6	CuTiO <sub>2</sub>	5
TiCe-50	67	CuTiCe-50	61
TiCe-70	54	CuTiCe-70	50
CeO <sub>2</sub>	43	CuCeO <sub>2</sub>	41

La Fig. 2, presenta los perfiles de reducción termoprogramada (TPR) de los catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>, donde se grafica el consumo de hidrógeno en función de la temperatura. En el se observa que el consumo de H<sub>2</sub> inicia alrededor de 150 °C y finaliza en 350 °C. Este H<sub>2</sub> consumido es atribuido a la reducción de las diferentes especies de cobre presentes en el catalizador. Es claro también, que los picos de reducción del CuO se desplazan a menor temperatura conforme se enriquece el soporte catalítico con CeO<sub>2</sub>, mientras que los catalizadores, con alto contenido en TiO<sub>2</sub>, los máximos de reducción se localizaron a mayores temperaturas. En el perfil de TPR del catalizador CuO/CeO<sub>2</sub> tres picos asociados con la reducción del CuO fueron observados, indicando la presencia de diferentes especies de cobre en este catalizador. Varios grupos han estudiado la reducibilidad de CuO en diferentes soportes (Liu y Flytzani-Stephanopoulos, 1996, Kundakovic y Flytzani-Stephanopoulos, 1998, Díaz *y col.*, 1999). Ellos observaron picos de reducción del CuO en el rango de

(Liu y Flytzani-Stephanopoulos, 1996, Kundakovic y Flytzani-Stephanopoulos, 1998, Díaz y col., 1999). Ellos observaron picos de reducción del CuO en el rango de 125-190 °C y por arriba de los 200 °C. El primer pico de reducción fue atribuido a la presencia de cristalitas de CuO disperso, mientras que el segundo pico fue atribuido a la reducción de partículas de CuO tipo másico. Con base en esos resultados, en este trabajo se atribuye al pico de reducción por debajo de los 190 °C (observado en el catalizador CuO/CeO<sub>2</sub>) a la presencia de cristalitas de CuO dispersos en la superficie del CeO<sub>2</sub>, mientras que los picos de reducción por arriba de los 200 °C a cristalitas de CuO tipo másico.

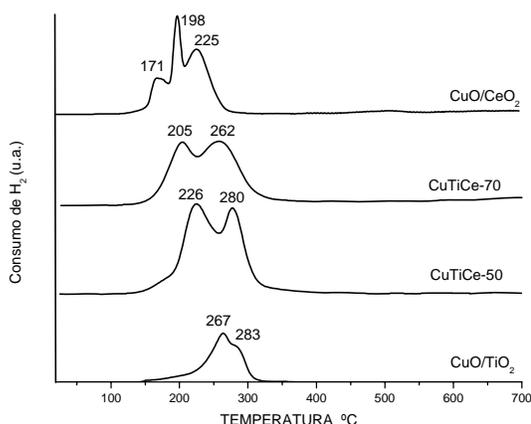


Fig. 2. Perfiles de reducción termoprogramada (TPR) de catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>.

Aun cuando en el catalizador CuTiCe-50 picos de difracción atribuidos al CuO tipo másico no fueron observados, estos fueron puestos en evidencia por TPR (picos de reducción a temperaturas > 200°C). Un aspecto a destacar en la muestra de CuO/CeO<sub>2</sub> es que aún cuando éste no presenta el área específica más elevada, sí presenta especies de cobre que son reducidas a baja temperatura, lo que indica que el Cu se dispersa de mejor manera en la superficie del CeO<sub>2</sub>. La Tabla 2 presenta los valores de consumo de H<sub>2</sub> de cada uno de los catalizadores proveniente de los perfiles de TPR, el cual es asociado con la reducción del CuO. El consumo de H<sub>2</sub> en

los catalizadores de CuO soportado en CeO<sub>2</sub> y TiO<sub>2</sub> fue menor al esperado para la reducción total del óxido de cobre. En los catalizadores cuyo soporte es el óxido mixto, se observó un mayor consumo del hidrógeno respecto de los catalizadores soportados en óxidos simples. En el catalizador CuTiCe-50 se cuantificó un exceso en H<sub>2</sub> consumido al necesario para reducir todo el CuO presente en el catalizador. Se ha observado en catalizadores de metales soportados en CeO<sub>2</sub>, que durante el proceso de reducción, una fracción de H<sub>2</sub> es promovido al soporte provocando su reducción parcial, causando un excedente en el consumo de H<sub>2</sub> necesario para la reducción de la fase activa (Fornasiero y col., 1995, Bernal y col. 1992., Perez-Hernández R. y col. 2005). Resultado que pudiera explicar el exceso de H<sub>2</sub> consumido en la muestra CuTiCe-50.

Tabla 2. Consumo de H<sub>2</sub> (μmol/g) de los catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub>.

Catalizador	μmol H <sub>2</sub> / g cat	μmolH <sub>2</sub> / μmolCu
CuTiO <sub>2</sub>	33.58	0.43
CuTiCe-50	91.92	1.17
CuTiCe-70	74.93	0.95
CuCeO <sub>2</sub>	51.52	0.66

Los resultados de actividad catalítica de los catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> en la reacción de reducción de NO con CO en función de la temperatura se presenta en la Fig. 3. Se observa que el catalizador CuO/CeO<sub>2</sub> presenta alta conversión al inicio de la reacción y el 100% lo alcanzó a los 450 °C. En el catalizador CuO/TiO<sub>2</sub> la temperatura de encendido inicia a 300 °C y se incrementa con la temperatura de reacción, observándose un 45 % de conversión a 450 °C. La actividad catalítica del catalizador CuTiCe-50 mostró una conversión similar a la del catalizador CuO/TiO<sub>2</sub>. En tanto que en el catalizador CuTiCe-70 la actividad catalítica observada fue mayor a la de los catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub> y CuTiCe-50, pero menor al de la

muestra CuO/CeO<sub>2</sub>. Los catalizadores presentaron el siguiente comportamiento en la conversión del NO: CuO/CeO<sub>2</sub> >> CuTiCe-70 > CuTiCe-50 ≈ CuO/TiO<sub>2</sub>. Este comportamiento puede ser correlacionado con la presencia de especies de cobre altamente dispersas y cobre tipo másico presentes en el catalizador. TPR mostró que el catalizador CuO/CeO<sub>2</sub> tiene especies de cobre altamente dispersas, mismas que no están presentes en los demás catalizadores estudiados en este trabajo. Por tal razón sugerimos que CuO tipo másico no es activo para la reacción NO + CO. Bera y col., 1999, reportan la presencia de iones Cu<sup>2+</sup> en la superficie del catalizador 5% Cu/CeO<sub>2</sub>, responsables de la actividad catalítica en la reacción NO + CO a bajas temperaturas. Un aspecto que no debemos descartar, es que durante la reacción catalítica, el CO puede provocar también una reducción parcial del soporte provocando de esta manera el efecto SMSI (strong metal support interaction), efecto que puede modificar la actividad del catalizador. La selectividad hacia N<sub>2</sub> en todos los catalizadores fue del 100% y en ninguna temperatura observamos la formación de N<sub>2</sub>O como subproducto de la reacción.

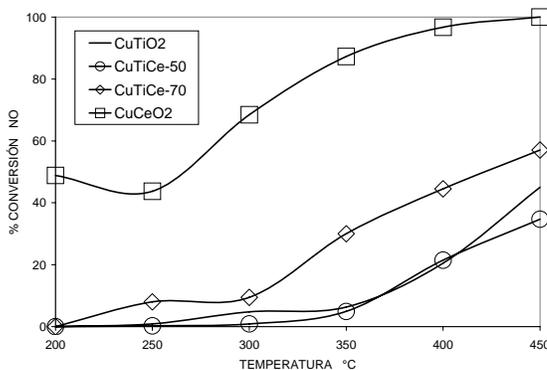


Fig. 3. Actividad total de los catalizadores en la reacción NO+CO. Evolución de la conversión de NO con respecto a la temperatura de reacción.

La Fig. 4 presenta la estabilidad de los catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> durante la

reducción del NO con CO en función del tiempo de reacción. Se observa claramente en los catalizadores CuTiCe-50 y CuTiCe-70 un periodo de inducción durante los primeros 180 min de prueba catalítica. Excepto en los catalizadores CuO/CeO<sub>2</sub> y CuO/TiO<sub>2</sub> donde la actividad es prácticamente constante en todo el intervalo de la reacción. Este comportamiento puede ser explicado en términos de los cambios en el proceso redox del cobre (Cu<sup>+</sup>/Cu<sup>2+</sup>) durante la reacción como ha sido reportado para catalizadores de CuO-SiO<sub>2</sub> (Díaz y col. 1999). Aunado a las especies de cobre altamente dispersas presentes en el catalizador CuO/CeO<sub>2</sub> (observadas por TPR-pico de reducción centrado en 171 °C), pudieran explicar el mejor desempeño del catalizador CuO/CeO<sub>2</sub> durante la reacción.

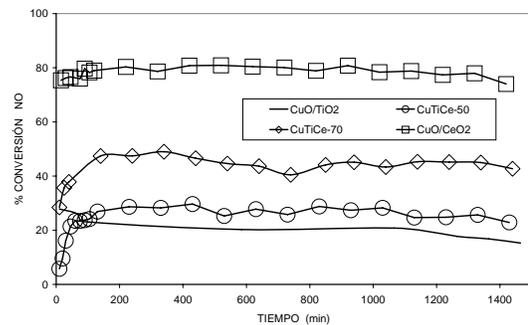


Fig. 4. Estabilidad de los catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> en la reacción NO + CO con respecto al tiempo.

### Conclusiones

Se estudiaron las propiedades catalíticas de catalizadores CuO/TiO<sub>2</sub>-CeO<sub>2</sub> en la reacción de reducción del óxido nítrico con monóxido de carbono en función de la temperatura de reacción. Se observó que la adición de 50% de CeO<sub>2</sub> a la titania favorece el área específica de los materiales catalíticos. Cuando se utilizó CeO<sub>2</sub> como soporte el CuO se dispersa de mejor manera como fue mostrado en los resultados de TPR, debido a que este catalizador (CuO/CeO<sub>2</sub>) presenta picos de reducción de CuO a menor temperatura respecto de todos

los catalizadores estudiados. Especies de óxido de cobre que son reducidas a menor temperatura parecen tener un mejor desempeño en los cambios redox del cobre durante la reacción catalítica, responsables del comportamiento catalítico para la eliminación del NO.

### Agradecimientos

Al ININ por el financiamiento del proyecto CM-520 a I.Q. Leticia Carapia y Jorge Pérez por el apoyo técnico.

### Referencias

- Bera, P., Aruna, S.T., Patil, K.C. y Hegde, M.S. (1999). Studies on Cu/CeO<sub>2</sub>: A New NO Reduction Catalyst. *Journal of Catalysis* 186, 36-44.
- Bernal, S., Calvino, J.J., Cifredo, G.A., Rodríguez-Izquierdo, J.M., Pericón, V. y Laachi, R. A. (1992). Reversibility of hydrogen chemisorption on a ceria-supported rhodium catalyst. *Journal of Catalysis* 137, 1-11
- Daturi, M., Cremona, A., Milella, F., Busca, G., y Vogna, E. (1998). Characterization of zirconia-titania powders prepared by coprecipitation. *Journal of European Ceramic Society* 18, 1079-1087.
- Díaz, G., Pérez-Hernández, R., Gómez-Cortés, A., Benaissa, M., Mariscal, R. y Fierro, J.L.G. (1999). CuO-SiO<sub>2</sub> Sol-Gel Catalysts: Characterization and Catalytic Properties for NO Reduction. *Journal of Catalysis* 187, 1-14.
- Egelhoff, Jr. W.F. (1982) en: D.A. King and D.P. Woodruff, Eds. *Chemical Physic and Heterogeneous Catalysis*, Vol. 4. Elsevier Science B.V. Amsterdam.
- Fornasiero, P., Di Monte, R., Ranga Rao, G., Kaspar, J., Meriani, S., Trovarelli, A. y Graziani, M. (1995). Rh-Loaded CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> Solid-Solutions as Highly Efficient Oxygen Exchangers: Dependence of the Reduction Behavior and the Oxygen Storage Capacity on the Structural-Properties. *Journal of Catalysis* 151, 168-177.
- Funabiki, M., Yamada, T. y Kayano, K. (1991). Auto exhausts catalysts. *Catalysis Today* 10, 33-43.
- Huang, T.J. y Yu, T.-C. (1991). Calcination conditions on copper/alumina catalysts for carbon monoxide oxidation and nitric oxide reduction. *Applied Catalysis* 71, 275-282.
- Iguamoto, M. y Hamada, H. (1991). Removal of nitrogen monoxide from exhaust gases through novel catalytic processes. *Catalysis Today* 10, 57-71.
- Kummer, J. T. (1980). Monolayer Dispersive Supported CuO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts Studied by XAFS. *Progress in Energy and Combustion Science* 6, 177-199.
- Kundakovic, L. y Flytzani-Stephanopoulos M. (1998). Reduction characteristics of copper oxide in cerium and zirconium oxide systems. *Applied Catalysis A: 171*, 13-29.
- Larsson, P. y Andersson, A. (1998). Complete Oxidation of CO, Ethanol, and Ethyl Acetate over Copper Oxide Supported on Titania and Ceria Modified Titania. *Journal of Catalysis* 179, 72-89.
- Liu, W. y Flytzani-Stephanopoulos, M. (1996). *Chemical Engineering Journal* 64, 283-294.
- Okamoto, Y. y Gotoh, H. (1997). Copper-zirconia catalysts for NO-CO reactions. *Catalysis Today* 36, 71-79.
- Pérez-Hernández, R. (2005). Estudio de las propiedades catalíticas del Pt soportado en ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> para la eliminación del óxido nítrico. *Tesis de doctorado*. FQ-

- Universidad Autónoma del Estado de México.
- Pérez-Hernández, R., Gómez-Cortés, A., Arenas-Alatorre, J., Rojas, S., Mariscal, R., Fierro, J. L. G. y Díaz, G. (2005). SCR of NO by CH<sub>4</sub> on Pt/ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Sol-gel Catalysts. *Catalysis Today* 107-108, 149-156.
- Trovarelli, A., Leitenburg, C. y Boaro, M. (1999). The utilization of ceria in industrial catalysis. *Catalysis Today* 50, 353-367.
- Yao, H.C. y Yu Yao, Y.F. (1984). Ceria in automotive exhaust catalysts: I. Oxygen storage. *Journal of Catalysis* 86, 254-265.
- Zhu, H., Shen, M., Kong, Y., Hong, J., Hu, Y., Liu, T., Dong, L., Chen, Y., Jian, C. y Liu, Z. (2004). Characterization of copper oxide supported on ceria-modified anatase. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical* 219, 155-164.