

## Efecto que Tiene la Presencia de H<sub>2</sub> en la Reducción de NO con un Catalizador Estructurado de Pt-Ag

Naomi González-Hernández <sup>1,\*</sup>, José Luis Contreras-Larios <sup>1</sup>, Beatriz Zeifert <sup>2</sup>, Gustavo A. Fuentes <sup>3</sup>, Ricardo López-Medina <sup>1</sup>, María Eugenia Hernández-Teran <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Procesos de la Industria Química II, Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Ciudad de México, México

<sup>2</sup> ESIQIE, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

<sup>3</sup> Depto. de I.P.H., Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Ciudad de México, México

\* Autor de correspondencia: [naomigh25@gmail.com](mailto:naomigh25@gmail.com); Tel.: 5555092584

**Contaminación de Agua, Suelo y Aire** (Contaminación y control de emisiones atmosféricas)

Recibido: 14 de junio de 2025

Aceptado: 7 de agosto de 2025

Publicado: 12 de mayo de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.545>

**Resumen:** Se estudiaron los catalizadores de Pt-Ag soportados en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> promovidos con óxidos de tungsteno (WOx) depositados sobre estructuras cerámicas de cordierita que fueron preparados mediante el método de Dip-coating para la eliminación de óxidos de nitrógeno (NOx) que es generado de emisiones de gases de motores diésel usando C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> e H<sub>2</sub> como reductor en la reducción catalítica selectiva (HC-SCR). Los catalizadores fueron caracterizados mediante Fisisorción de N<sub>2</sub>, Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/EDX), Microscopía Electrónica de Transmisión (STEM/HAADF), Difracción de rayos X (DRX) y reducción de temperatura programada a temperatura (TPR-H<sub>2</sub>). Además, se determinó la dispersión de H<sub>2</sub>. La adición de H<sub>2</sub> (1 % vol.) sobre los gases de alimentación fue estudiada en la reducción de NO comparado con C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> evaluando a tres velocidades espaciales 30,000, 70,000 y 100,000 h<sup>-1</sup>. Esta combinación de Pt-Ag soportada en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WOx sobre monolitos de cordierita resultó activa en la reducción de NO y en la combustión de CO y C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>. Mediante STEM, se observó que partículas pequeñas de Pt-Ag (20 nm) presentaban una alta concentración de Pt (58,6% atómico). También se encontraron partículas de Ag separadas. Las mejores condiciones de preparación fueron de 3 a 4 impregnaciones con AlO(OH), impregnaciones sucesivas comenzando con H<sub>2</sub>PtCl<sub>3</sub> y calcinación en flujo de aire a 500°C. Con los resultados obtenidos, se propuso un modelo unidimensional de conversión de NO en función de la longitud del reactor.

**Palabras clave:** H<sub>2</sub>, SCR-NO, Pt-Ag, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WOx/Cordierita

## Effect of the Presence of H<sub>2</sub> on the Reduction of NO with Pt-Ag structured catalysts

**Abstract:** Pt-Ag catalysts supported on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and promoted with tungsten oxides (WOx), deposited onto ceramic cordierite structures, were studied for the removal of nitrogen oxides (NOx) generated from diesel engine exhaust emissions. The catalysts were prepared by the dip-coating method and evaluated using C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> and H<sub>2</sub> as reductants in selective catalytic reduction (HC-SCR). Catalyst characterization was carried out by N<sub>2</sub> physisorption, scanning electron microscopy (SEM/EDX), transmission electron microscopy (STEM/HAADF), X-ray diffraction (XRD), and temperature-programmed reduction with hydrogen (H<sub>2</sub>-TPR). In addition, H<sub>2</sub> dispersion was determined. The addition of H<sub>2</sub> (1 vol.%) to the feed gas was studied for NO reduction in comparison with C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> at three space velocities: 30,000, 70,000, and 100,000 h<sup>-1</sup>. The Pt-Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WOx system supported on cordierite monoliths showed high activity for NO reduction as well as for CO and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> combustion. STEM analysis revealed that small Pt-Ag particles (~20 nm) exhibited a high Pt concentration (58.6 at.%). Separate Ag particles were also observed. The optimal preparation conditions consisted of three to four AlO(OH) impregnation cycles, successive impregnations starting with H<sub>2</sub>PtCl<sub>3</sub>, and calcination under air flow at 500 °C. Based on the obtained results, a one-dimensional model describing NO conversion as a function of reactor length was proposed.

**Keywords:** H<sub>2</sub>, NO-SCR, Pt-Ag, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WOx/cordierite

### Introducción

Hoy en día el uso de transportes que emplea gasolina o diésel, representa un factor de gran relevancia en la contaminación del aire. Las emisiones que provienen de los motores a diésel, principalmente óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas (PM), son motivo de gran preocupación debido a los efectos que genera en la salud humana y el medio ambiente. Esto ha ocasionado que la legislación para reducir emisiones de NOx cada vez sea más estricta (Bueno-López *et al.*, 2006). Sin embargo, el desarrollo de sistemas eficientes para la reducción de contaminantes atmosféricos, como las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx: NO más NO<sub>2</sub>), aun representa un reto importante ya que es uno de los mayores desafíos para la protección del medio ambiente (Guangyan *et al.*, 2017).

La reducción catalítica selectiva de NO<sub>x</sub> (SCR-NO<sub>x</sub>) que usa un hidrocarburo (HC) como agente reductor, se ha propuesto como una de las tecnologías prometedoras que permiten eliminar los NO<sub>x</sub> (Briceño *et al.*, 2012). En estudios previos, esta tecnología no sólo ha empleado HC como agentes reductores, se han considerado algunos alcoholes como el metanol, etanol y butanol, ya que, han mostrado resultados favorables (Pavlo *et al.*, 2013). Sin embargo, un aspecto a considerar con el uso de la HC-SCR empleando catalizadores de Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, son las altas temperaturas requeridas para llevar a cabo la reducción de estos gases, y representa una desventaja relevante la falta de actividad a baja temperatura con el uso de estos catalizadores. Aunque, estudios previos han demostrado que su actividad a bajas temperaturas puede mejorar usando un HC de cadena larga, pero esto no es suficiente para lograr una mayor actividad del catalizador (Sawatmongkhon *et al.*, 2012). Se llevó a cabo el estudio de la reducción de NO con C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> empleando catalizadores soportados de Pt, Rh y Ag en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, los catalizadores que contenían Ag mostraron mayor actividad a temperaturas altas (>300°C), mientras que los que contenían Pt y Rh mostraron actividad a temperaturas más bajas (200-250°C) (Hong *et al.*, 2003). En general, para lograr una actividad razonable a baja temperatura, los HC más pesados requieren ser coalimentados con pequeñas concentraciones de H<sub>2</sub> (menos del 1%Vol.H<sub>2</sub>).

Previamente, se llevó a cabo el estudio de la reducción de NO con catalizadores de Pt-Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en polvo empleado C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> como reductor en la SCR, y los resultados obtenidos fueron de gran relevancia. Es por eso que el objetivo de este trabajo se basa en la obtención de catalizadores bimetalicos de Pt-Ag soportadas sobre Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> promovida con óxidos de tungsteno (WO<sub>x</sub>) depositados sobre monolitos de cordierita mediante la técnica de Dip-coating. El estudio contribuye a mejorar la actividad del catalizador Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> agregando cantidades mínimas de Pt y WO<sub>x</sub> para que sea resistente a la desactivación por sinterización, estabilizando la estructura porosa del Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, su actividad en la reducción de NO en presencia de C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y posterior adición de H<sub>2</sub> como un segundo gas reductor, para lo cual se utilizó una mezcla sintética de gases de emisión (CO, CO<sub>2</sub>, NO, O<sub>2</sub> y vapor de agua) similares a la que emiten los motores diésel.

## Materiales y Métodos

Para la obtención de los catalizadores estructurados, se utilizaron monolitos comerciales de cordierita (2MgO<sub>2</sub>·2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·5SiO<sub>2</sub>) con 400 células por pulgada cuadrada (cps) como soporte del catalizador Pt-Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub>. Los monolitos de cordierita poseen una forma cilíndrica (5 cm de largo x 2.54 cm de diámetro). Se prepararon mediante impregnación de una suspensión de boehmita (AlO(OH)) en agua, con los precursores Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>·9H<sub>2</sub>O (99 %, Fermont, México) más NH<sub>4</sub>OH al 30 % y (NH<sub>4</sub>)<sub>12</sub>W<sub>12</sub>O<sub>40</sub>·5H<sub>2</sub>O (66.55 %W, Aldrich) para obtener un contenido nominal de 0.5 % peso de W. El NH<sub>4</sub>OH al 30 % (J.T Baker, USA) se utilizó como agente precipitante para obtener una suspensión de (AlO(OH)) con un pH de 9. La suspensión de (AlO(OH)) promovida con (NH<sub>4</sub>)<sub>12</sub>W<sub>12</sub>O<sub>40</sub>·5H<sub>2</sub>O, se mantuvo en agitación constante durante 12 h a 25°C. Después de este tiempo de envejecimiento la suspensión quedó lista para la impregnación de los monolitos mediante el método de inmersión total.

Con la finalidad de estabilizar la fase y eliminar humedad e impurezas, los monolitos fueron tratados térmicamente, el proceso consistió en hacer pasar una corriente de aire (100 ml/min) durante 3 h a 500 °C sobre los canales de la estructura cerámica. Una vez concluida esta etapa, se inició con la impregnación de boehmita previamente sintetizada, la impregnación se llevó a cabo mediante las siguientes etapas: primero, el monolito se sumergió lentamente en la suspensión, para darle tiempo a que el aire se desplazará de los canales (Figura 1a). El monolito permaneció sumergido (1 a 1.5 h) en la suspensión hasta que el aire se desplazó por completo (Figura 1b). Posteriormente, el monolito fue extraído a velocidad constante y colocado en una posición que permitiera la eliminación del exceso de suspensión de los canales por acción de la gravedad (Figura 1c).

Se realizó una primera inmersión (I1) durante 1 h y se eliminó el exceso de suspensión. Se secó a 110 °C durante 24 h, y se pesó para determinar la cantidad de boehmita adherida a los canales del monolito. Para obtener una deposición final de 1 g de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub> cada monolito de 17.3 g se requirió de cuatro inmersiones, las cuales se denominaron: I2, I3 e I4 (Figura 2a). Los monolitos permanecieron sumergidos en la suspensión de boehmita durante 1 a 1.5 h para lograr una deposición de 5.8 o 2.3 % en peso de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub>. La etapa de calcinación de los materiales fue a 500 °C durante 6 h en un horno tubular con un flujo de aire de 100 ml/min. Con este procedimiento se estudió el efecto que tiene el número de inmersiones, la frecuencia de inmersión con respecto al espesor y el uso de sílice coloidal SiO<sub>2</sub> al 3 % peso. (LUDOX, suspensión al 40 % en peso, Aldrich) como adherente que influyó en la estabilidad del revestimiento (Figura 2b).

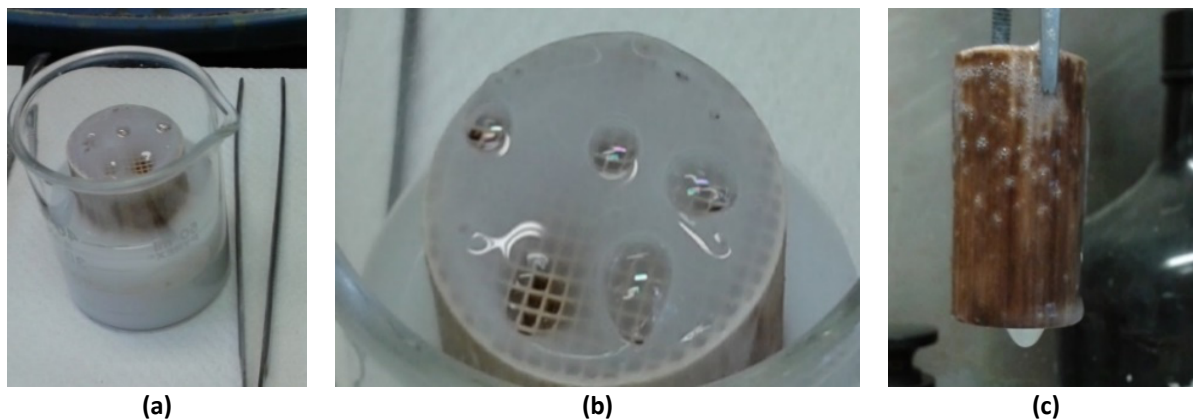


Figura 1. Impregnación de los monolitos mediante el método Dip-coating: (a) Inmersión del monolito, (b) desplazamiento de aire y (c) Extracción y eliminación del exceso de suspensión

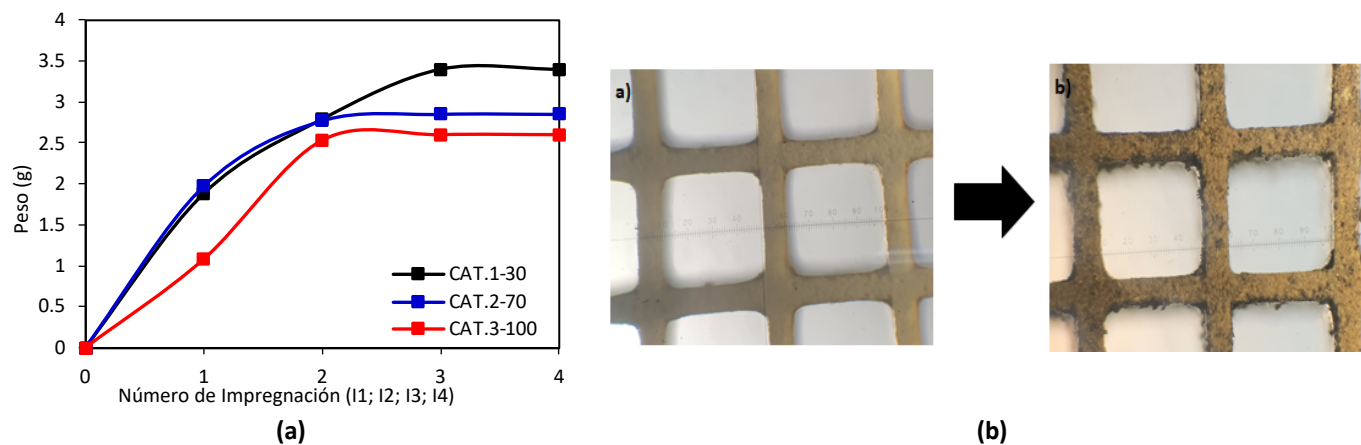


Figura 2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub> depositado sobre el monolito. (a) Aumento de peso de la Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub> con cada impregnación; (b) Canales del monolito limpio (a) y canales del monolito con la capa de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub> (b)

Las fases activas Pt y Ag fueron depositados sobre el soporte Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub>/Cordierita a partir de soluciones precursoras de H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub> y AgNO<sub>3</sub> mediante el método de impregnación por humedad incipiente. El contenido de Pt y Ag fue de 0.1 y 2 % peso respectivamente. La descomposición de los precursores por calcinación se llevó a cabo a 500 °C durante 6 h en un horno tubular con un flujo de aire de 100 ml/min. La etapa de activación de los catalizadores se realizó mediante reducción con flujo de H<sub>2</sub> a 500 °C por 3 h.

La actividad de los catalizadores se realizó en un reactor escala banco, usando una mezcla sintética de gases de emisión diésel previamente preparada, adicionando 1 % vol. H<sub>2</sub> que se generó mediante la reacción de reformado con vapor de etanol. Se varió el espacio velocidad (GHSV) de 30 000, 70 000 y 100 000 h<sup>-1</sup> y realizamos un barrido de temperatura en cada evaluación (50 a 500 °C). Para lograr una mezcla completa de emisiones diésel, se alimentó H<sub>2</sub>O que se transformó en vapor antes de ingresar al reactor mediante el uso de un saturado (12 % vol. H<sub>2</sub>O). La composición final de la mezcla de los gases de alimentación fue de 600 ppm de CO, 10 % vol. CO<sub>2</sub>, 6 % vol. O<sub>2</sub>, 1750 ppm C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, 750 ppm NO y N<sub>2</sub> como balance.

El análisis de los reactivos y productos de reacción fue determinado con un Analizador de Emisiones Automotriz (Marca CONSINO, Modelo FGA-4100(5G)). La producción de H<sub>2</sub> se llevó a cabo en un microreactor tubular de lecho fijo. Se usaron 0.3 g de catalizador con 10 % peso Ni-4.5 % peso Co/Hidrotalcita-WO<sub>x</sub>, el flujo de gas de arrastre (mezcla sintética de gases de emisión diésel) fue de 30 ml/min y la temperatura de reacción se mantuvo en 450 °C.

## Resultados y Discusión

El soporte depositado sobre los monolitos de cordierita (denominado γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub>/Cordierita), mostró isoterma tipo IV que indican la presencia de adsorción física en multicapas, que son características de los sólidos mesoporosos (Shelef

*et al.*, 1994). El área de la muestra  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{WO}_x$ /Cordierita presentó el valor y el volumen de poros más altos (Tabla 1). Los catalizadores frescos CAT.1-30, CAT.2-70 y CAT.3-100 también presentaron isoterma tipo IV. La Tabla 1 muestra las áreas y la distribución del tamaño de poro de los catalizadores (calcinados a 500 °C durante 6 h y reducidos a 500 °C durante 3 h).

Tabla 1. Propiedades texturales y de dispersión de Pt de los catalizadores de Pt-Ag/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{WO}_x$ /Cordierita

Catalizadores	Clave	$S_{\text{BET}}$ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	$V_p$ ( $\text{cm}^3/\text{g}$ )	$D_p$ (Å)	$D_{\text{Pt}}^a$
$\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{WO}_x$ /Cordierita	AW/C	55.89	0.09	28.59	--
0.1Pt-2Ag/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{WO}_x$ /Cordierita	CAT.1-30	20.90	0.03	66.62	76.8
	CAT.2-70	20.64	0.03	55.26	70.8
	CAT.3-100	21.00	0.03	59.00	35.4

<sup>a</sup>  $D_{\text{Pt}}$ : Dispersión de Platino determinado mediante Quimisorción de  $\text{H}_2$

El patrón de difracción del soporte (Figura 3a) muestra picos intensos y agudos, característicos de la cordierita cristalina (Xiaohong *et al.*, 2017). Los patrones de difracción de los catalizadores CAT.1-30 (Figura 3b), CAT.2-70 (Figura 3c) y CAT.3-100 (Figura 3d) mostraron tres reflexiones amplias de baja intensidad en  $2\theta = 37^\circ$ ,  $46^\circ$  y  $67^\circ$  correspondientes a los planos (311), (400) y (440) de la  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en su fase cúbica (tarjeta JCPDS n° 10-0425). Los picos característicos indican muestras amorfas con baja cristalinidad. Esto concuerda con lo reportado por Hernández Terán y Fuentes (2014) para el soporte  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Es de gran relevancia mencionar que la etapa de calcinación mejoró la dispersión de Pt sobre los catalizadores soportados (Tabla 1), porque el flujo de aire favoreció la formación de PtOx a partir de PtOxCl<sub>y</sub> (oxicluros de Pt), sobre  $\text{Al}_2\text{O}_3$  que son necesarios para la reducción a Pt metálico (Lietz *et al.*, 1983).

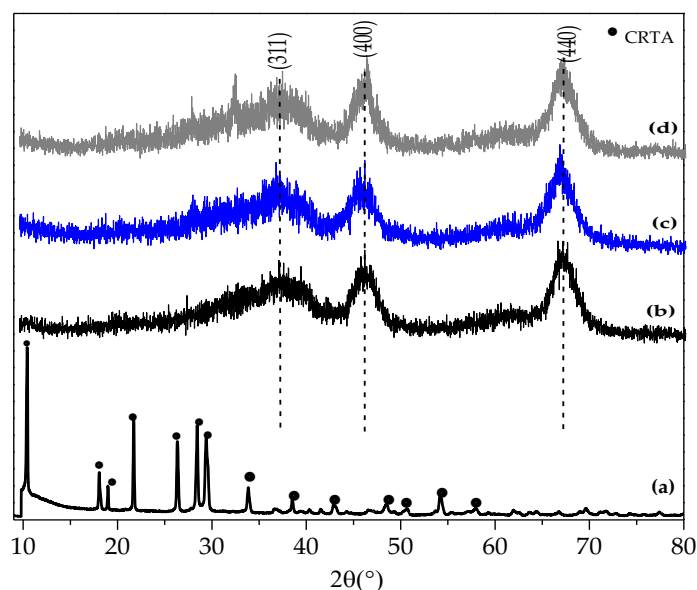


Figura 3. (a) Propiedades de textura y área de los catalizadores estructurados y (b) Patrón de difracción de rayos X de catalizadores sobre monolitos de cordierita

Las imágenes SEM de las paredes internas del soporte y los catalizadores soportados en la superficie de los monolitos de cordierita se muestran en la Figura 4. La imagen SEM del monolito de cordierita limpio (Cordierita, Figuras 4(a) y (b)) con diferentes aumentos (X1.500 y X20.000 respectivamente). El recubrimiento de soporte secundario ( $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) realizado mediante el método de recubrimiento por inmersión ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{WO}_x$ /Cordierita, Figuras 4c y 4d), muestra el recubrimiento dentro de los canales del monolito. Utilizando esta técnica de caracterización, observamos la homogeneidad del recubrimiento (Figura 4c) y obtuvimos un espesor de recubrimiento de 35  $\mu\text{m}$ . Después de recubrir el soporte, se obtuvo aproximadamente 5 % en peso de  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{WO}_x$  sobre monolito de cordierita. En todas estas figuras el tipo de porosidad fue muy diferente al observado en la cordierita fresca. El recubrimiento de soporte

secundario forma una capa dentro de los canales del monolito, lo que se espera ayude a mejorar la interacción con la capa de las fases activas (Pt-Ag).

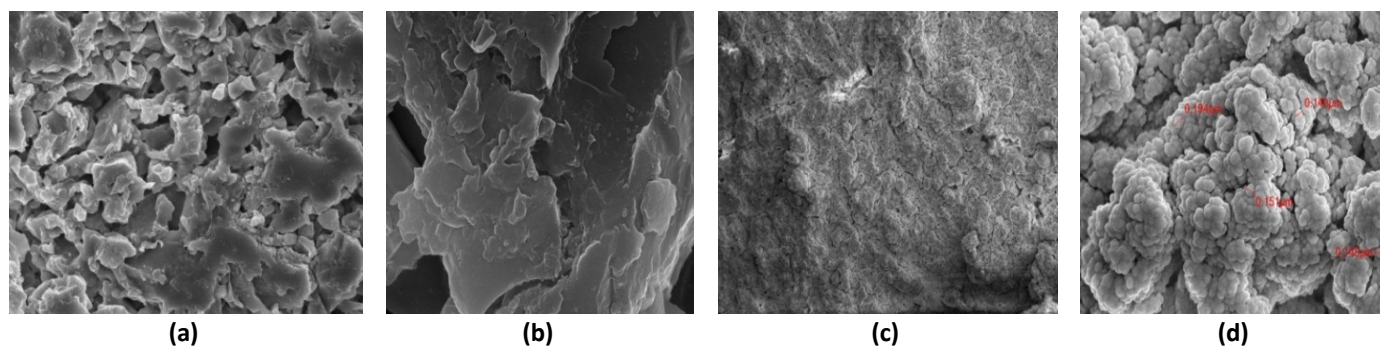


Figura 4. Imágenes SEM del monolito de cordierita limpio (a y b) y el soporte  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub> depositado sobre la cordierita (c y d)

El catalizador 0.1 %p.Pt - 2%p.Ag /Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub>/Cordierita (CAT.1-30, donde el número 30 se refiere a haber sido evaluado a un GHSV de 30 000 h<sup>-1</sup>) calcinado se muestra en la Figura 5(a), se observan nanopartículas de Ag (metal con alta densidad) que contrastan con el soporte de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, teniendo formas redondas sin ser esferas perfectas. La Figura 5(b) muestra el histograma de tamaño de partícula, obteniendo un tamaño de partícula promedio de 24.04 nm en forma monomodal con tamaños que van de 10 a 60 nm.

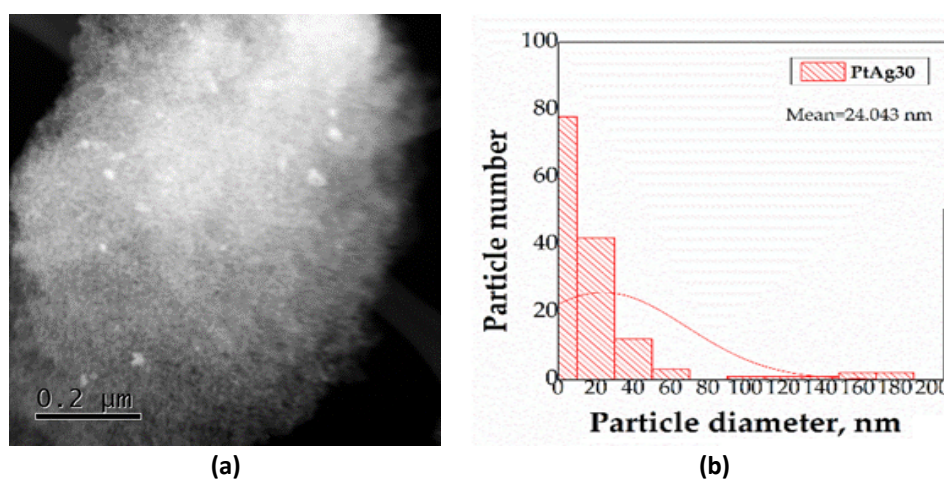


Figura 5. (a) STEM del catalizador 0.1 %p. Pt-2 %p. Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub>/Cordierita (CAT.1-30) con escala de 0.2 μm; (b) Histograma de diámetro de partícula

Durante la conversión de NO en función de la temperatura para los catalizadores CAT.1-30, CAT.2-70 y CAT.3-100, (donde el número 30, 70 y 100 se refieren a haber sido evaluados a 30000, 70000 y 100000 h<sup>-1</sup>) se observó una conversión máxima del 95, 91 y 83 % a 350°C respectivamente (Figura 6). Como ya hemos revisado, en este rango el agente reductor es principalmente el propano o HC, incluso en catalizadores de Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y donde el producto principal es el N<sub>2</sub> (Ström *et al.*, 2018).

La conversión de los tres catalizadores fue muy similar, con un hombro entre 150 y 200 °C, lo que corresponde a una conversión de aproximadamente el 50 %. La actividad entre los tres catalizadores fue la siguiente: CAT.1-30 > CAT.2-70 > CAT.3-100. Esta tendencia está relacionada, primeramente, con el contenido de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> en cada uno de los monolitos completos, que fue del 2,97 %, 2,33 % y 2,04 % en peso, respectivamente y con el flujo de los gases reactivo durante la reacción. Las áreas superficiales fueron de 21, 20.6 y 21 m<sup>2</sup>/g, respectivamente. Aunque los sitios activos para esta reacción están asociados principalmente con Ag, se ha demostrado que la adición de pequeñas cantidades de Pt (<0.1 %p. de Pt) mejora la conversión de NO y amplía la ventana de temperatura de reacción, particularmente a bajas temperaturas (100–180°C) (González *et al.*, 2020).

Por otra parte, es sabido que en presencia de pequeñas cantidades de  $H_2$  sugieren que se llevan a cabo dos funciones. Primero, el  $H_2$  podría eliminar los nitratos adsorbidos con la formación simultánea de más sitios de Ag y, en segundo lugar, la velocidad de reacción de reducción en los sitios de Ag ha sido más rápida, debido a una energía de activación ( $E_a$ ) más baja que la energía de activación cuando no hay  $H_2$  (Singh *et al.*, 2018).

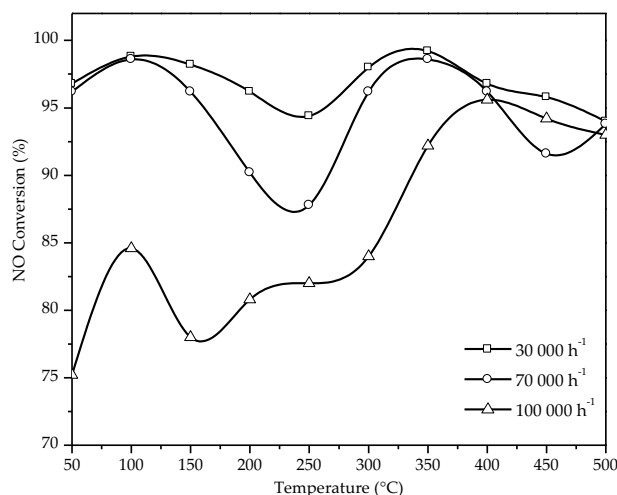


Figura 6. Conversión de NO en función de la temperatura de reacción utilizando el catalizador 0.1%Pt-2%Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub>/Cordierita (CAT.1-30; CAT.2-70; CAT.3-100)

## Conclusiones

Resultado de gran relevancia el proceso de recubrimiento del monolito con el soporte  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub> mediante el método Dip-coating, mostrando un aumento en el peso de la boehmita (AlO(OH)) en los monolitos de cordierita luego de realizar las impregnaciones para saturar la superficie interna del monolito. El espesor promedio del recubrimiento de  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>x</sub> resultó de 35  $\mu$ m, que comparado con lo reportado en la literatura estamos obteniendo algo muy cercano (40  $\mu$ m). Las mejores condiciones de preparación fueron: de 3 a 4 impregnaciones sucesivas con boehmita (AlO(OH)), y una etapa de calcinación en atmósfera de aire a 500°C. Se observó que a medida que aumentaba el número de ciclos de inmersión, la viscosidad de la suspensión también aumentaba (de 500 a 900 mPa·s). Mediante TEM se encontró que al disminuir el diámetro de la partícula a 20 nm, la concentración de Pt aumenta a 58,6 at.%, mientras que, si el diámetro aumenta a 30 nm, la concentración de Pt disminuye a 11 at.%. El perfil de conversión de NO con respecto a la temperatura de reacción del catalizador fue muy similar al perfil del mismo catalizador evaluado en polvo, sin embargo, el tiempo de reacción fue mucho mayor, considerando que se usaron flujos de gas de alimentación mayores que los empleados en los catalizadores en polvo, debido a la variación del espacio velocidad (GHSV). La conversión máxima de NO en los catalizadores CAT.1-30, CAT.2-70 y CAT.3-100 fue de 95, 91 y 83 % a 350°C respectivamente y el orden de actividad entre los tres catalizadores fue el siguiente: CAT.1-30 > CAT.2-70 > CAT.3-100.

**Agradecimientos y financiamiento:** Se agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de posgrado otorgada a través del programa 001379 y agradecemos al Laboratorio de Procesos de la Industria Química, UAM-A y al Dr. José Luis Contreras Larios.

## Bibliografía

- Briceño, S., Sagredo, V., & Del Castillo, H. (2012). Sinergia en la reducción catalítica selectiva de NO<sub>x</sub> sobre ferritas Cu<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 32(1), 129–135. [https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0255-69522012000100015&script=sci\\_arttext](https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0255-69522012000100015&script=sci_arttext)
- Bueno-López, A., Illán-Gómez, M. J., & Salinas-Martínez de Lecea, C. (2006). Effect of NO<sub>x</sub> and C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> partial pressures on the activity of Pt-beta-coated cordierite monoliths for de NO<sub>x</sub> C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-SCR. *Applied Catalysis A: General*, 302(2), 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2006.01.021>
- González Hernández, N. N., Contreras, J. L., Pinto, M., Zeifert, B., Flores Moreno, J. L., Fuentes, G. A., Hernández-Terán, M. E., Vázquez, T., Salmones, J., & Jurado, J. M. (2020). Improved NO<sub>x</sub> reduction using C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> and H<sub>2</sub> with Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts promoted with Pt and WO<sub>x</sub>. *Catalysts*, 10, 1212. <https://doi.org/10.3390/catal10101212>

- Guangyan, X., Jinzhu, M., Guangzhi, H., Yunbo, Y., & Hong, H. (2017). An alumina-supported silver catalyst with high water tolerance for H<sub>2</sub>-assisted C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>-SCR of NO<sub>x</sub>. *Applied Catalysis B: Environmental*, 207, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.02.001>
- Hernández-Terán, M. E., & Fuentes, G. A. (2014). Enhancement by H<sub>2</sub> of C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>-SCR of NO<sub>x</sub> using Ag/γ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Fuel*, 138, 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.07.070>
- Hong, H., Jin, W., Qingcai, F., Yunbo, Y., & Kiyohide, Y. (2003). Novel Pd-promoted Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst for the selective reduction of NO<sub>x</sub>. *Applied Catalysis B: Environmental*, 46(2), 365–370. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00242-X](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00242-X)
- Lietz, G., Lieske, H., Spindler, H., Hanke, W., & Völter, J. (1983). Reactions of platinum in oxygen- and hydrogen-treated catalysts: II. Ultraviolet-visible studies, sintering of platinum, and soluble platinum. *Journal of Catalysis*, 81, 17–25. [https://doi.org/10.1016/0021-9517\(83\)90143-4](https://doi.org/10.1016/0021-9517(83)90143-4)
- Pavlo, K., Nataliia, P., Sergiy, S., Svitlana, O., & Dzwigaj, S. (2013). Remarkable activity of Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/cordierite catalysts in SCR of NO with ethanol and butanol. *Applied Catalysis B: Environmental*, 140–141, 691–699. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.04.067>
- Sawatmongkhon, B., Tsolakis, A., Theinnoi, K., York, A. P. E., Millington, P. J., & Rajaram, R. R. (2012). Microkinetic modelling for selective catalytic reduction (SCR) of NO<sub>x</sub> by propane in a silver-based automotive catalytic converter. *Applied Catalysis B: Environmental*, 111–112, 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.09.031>
- Shelef, M., Montreuil, C. N., & Jen, H. W. (1994). NO<sub>2</sub> formation over Cu-ZSM-5 and the selective catalytic reduction of NO. *Catalysis Letters*, 26, 277–284.
- Singh, P., Yadav, D., Thakur, P., Pandey, J., & Prasad, R. (2018). Studies on H<sub>2</sub>-assisted liquefied petroleum gas reduction of NO over Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 13(2), 227–235. <https://doi.org/10.9767/bcrec.13.2.1307.227-235>
- Ström, L., Carlsson, P.-A., Skoglundh, M., & Härelind, H. (2018). Surface species and metal oxidation state during H<sub>2</sub>-assisted NH<sub>3</sub>-SCR of NO<sub>x</sub> over alumina-supported silver and indium. *Catalysts*, 8(1), 38. <https://doi.org/10.3390/catal8010038>
- Xiaohong, X., Yinfen, Z., Jianfeng, W., Cheng, H., & Zhaohui, T. (2017). Preparation and performance study of cordierite/mullite composite ceramics for solar thermal energy storage. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 14(2), 162–172. <https://doi.org/10.1111/ijac.12626>