

## Complejos de Cr(III) con ligantes tipo triazaciclohexano: hacia una economía circular

Cr(III) complexes with triazacyclohexane-type ligands: towards a circular economy

Martinez Prado Laura Iveth<sup>1</sup>, Juarez Aranda Reynaldo Hassan<sup>1</sup>, Reyes Aguilera José Antonio<sup>2</sup>, Mendoza María de los Ángeles<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Licenciatura en Ingeniería Química Sustentable, División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato.

<sup>2</sup>Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica, División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato.

li.martinezprado@ugto.mx, rh.juarezaranda@ugto.mx, ja.reyes@ugto.mx, angeles.mendoza@ugto.mx

### Resumen

El cromo (III) es un elemento presente en grandes cantidades en las aguas residuales de una gran variedad de procesos industriales representando serios problemas ambientales. Con la finalidad de desarrollar nuevas técnicas en el tratamiento de estos residuos acuosos y además de dar un valor agregado a los residuos tratados, en este trabajo se realizó la síntesis del ligante tridentado tipo N,N,N, para posteriormente emplearlo en la síntesis de un complejo de coordinación de Cr (III), tomando como fuente metálica soluciones acuosas que contienen Cr (III). Se realizó la caracterización tanto del ligante como del complejo metálico mediante las técnicas de espectroscopía de RMN <sup>1</sup>H y FTIR ATR para la interpretación estructural de las moléculas obtenidas. Asimismo, se realizó un análisis mediante UV-vis para la cuantificación de Cr(III) presente en muestras contaminadas con Cr (III) y la solución acuosa después de ser tratada con el ligante tridentado, obteniendo la remoción cuantitativa de Cr (III) (>99.9%), esto en base a la diferencia entre la concentración inicial de Cr (III) 433.43 ppm. El complejo metálico de Cr (III) obtenido, fue utilizado como posible catalizador para el proceso de oligomerización de olefinas, con la finalidad de darle un valor agregado al producto obtenido e implementar la economía circular.

**Palabras clave:** ligante; síntesis de complejos; catálisis heterogénea; remediación ambiental; caracterización de materiales.

### Introducción

La actividad antropogénica tiene repercusiones muy graves en el medio ambiente, lo cual puede impactar a nivel ambiental, social, de salud e industrial. Entre las industrias con mayor repercusión se puede mencionar aquellas del ámbito industrial, si bien por una parte es importante contar con actividades industriales que generen riqueza, proveen bienes a la sociedad y generan bienestar social, es importante que se tomen acciones buscando sostenibilidad de los procesos industriales, desde esta perspectiva, es importante el cuidado que se tenga con el medio ambiente, buscando eliminar o minimizar el impacto ambiental por la generación de efluentes sólidos, líquidos o gaseosos [1].

En este sentido, la industria en Guanajuato es importante y, según el reporte emitido por el INEGI para el primer cuatrimestre de 2025, ocupa la segunda posición a nivel nacional [2] en el ramo de las manufacturas; sin embargo, presenta importantes, y urgentes, áreas de oportunidad, en particular en el tratamiento de efluentes de compuestos químicos.

<sup>1</sup>Agenda 2030. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Consultado (julio 2025). <https://www.un.org/es/actnow/>

<sup>2</sup>Posición de Guanajuato en la producción industrial nacional INEGI. Consultado (julio de 2025). <https://www.inegi.org.mx/temas/manufacturas/>

Una rama de la industria importante en Guanajuato emplea metales, o iones metálicos, que están considerados como contaminantes, y a concentraciones elevadas, un caso de particular interés es el cromo, que es empleado en diversas industrias (automotriz, metal-mecánica, curtiduría, pigmentos, por mencionar algunas). Muchos de los efluentes que contienen a dicho metal no son tratados y son emitidos al sistema de drenaje, ríos o cuerpos de agua, con el riesgo inminente de contaminación de los mantos freáticos. El cromo es un metal pesado que se puede presentar en los efluentes en sus estados de oxidación (III) y (VI), ambos son no biodegradables, y si bien el Cr (III) es considerado necesario en algunos procesos biológicos, concentraciones elevadas son altamente perjudiciales para la vida humana. Adicionalmente, el Cr (III) presente ya en el medio ambiente es susceptible de oxidarse a Cr (VI) el cual es reportado como cancerígeno [3]. También representa un problema ambiental debido a su persistencia, acumulación en el tiempo y efectos impredecible sobre la vida acuática.

De acuerdo con la norma NOM-052-SEMARNART-2005, que establecen las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de residuos peligrosos con un límite máximo permisible a 5 ppm de cromo en los residuos para la industria en general [4].

La NOM-001-SEMARNART-2021, que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación establece como límite máximo permisible lo siguiente [5]:

- Para ríos, arroyos, canales y drenajes: 1.5 ppm
- Embalses, lagos y lagunas: 1 ppm
- Zonas marinas mexicanas: 1.5 ppm
- Riego de áreas verdes: 1 ppm
- Infiltración y otros riegos: 1 ppm

En concordancia con la SEMARNART, uno de los objetivos al desarrollar este proyecto es tratar efluentes que contengan concentraciones elevadas de Cr (III), empleándolo como reactivo en procesos de síntesis de compuestos de coordinación con aplicaciones futuras de interés industrial, logrando al mismo tiempo remediar el contaminante que representa el ion metálico y fortaleciendo la sostenibilidad de los procesos al lograr reutilizar el agua de los efluentes que contenían al metal y, adicionalmente, emplearlo en procesos industriales de alto impacto económico, como la oligomerización de olefinas, por mencionar alguna aplicación, mejorando la economía circular de los procesos involucrados.

En los campos de la química de polímeros y catálisis, los catalizadores homogéneos con metales de transición se han utilizado ampliamente para polimerizar olefinas y ha resultado de gran interés. En el año 1950, se desarrollaron catalizadores heterogéneos basados en cromo, tales como los catalizadores Phillips y Unipol de Union Carbide [6] que se han utilizado ampliamente en la fabricación de polietileno de alta densidad (HDPE) pero se han realizado pocas investigaciones de este. En los últimos tiempos, se han realizado estudios limitados sobre catalizadores de cromo en función con oxígeno. Además, Ruiguo sintetizó una serie de complejos de ciclopentadienilcromo con oxígeno y azufre de geometría restringida, los cuales fueron usados como precursores de catalizadores para la polimerización de olefinas. Asimismo, se ha utilizado metilaluminoxano (MAO) como co-catalizador para aumentar el rendimiento de la polimerización de etileno. Resultados recientes han revelado que los complejos de Cr (III) son catalizadores altamente activos, particularmente para la oligomerización de etileno [7].

<sup>3</sup> Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades. Consultado (julio 2025). [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts7.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts7.html)

<sup>4</sup> Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. (2006). Establecimiento de las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos (NOM-052-SEMARNART-2005). Consultado (julio 2025). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005.

<sup>5</sup> Diario oficial. (2022). Establecimiento de los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. (NOM-001-SEMARNART-2021). Consultado (julio 2025). semarnat001-2022\_03.pdf

<sup>6</sup> Catalizador de Phillips y su empleo para la obtención de copolímeros de etileno-alfa-olefinas. Patente ES2101143T3. Consultado (julio 2025). <https://patents.google.com/patent/ES2101143T3/es>

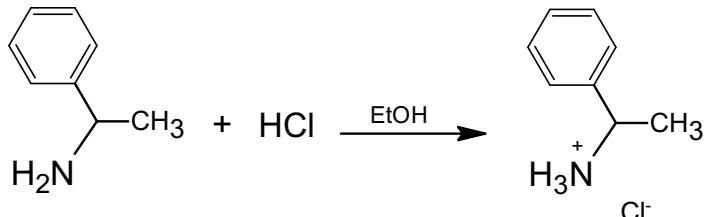
<sup>7</sup> Kumar, A., Dholakiya, B., & Jangir, R. (2021). *Role of organometallic complexes in olefin polymerization*. Consultado (julio 2025). Role of organometallic complexes in olefin polymerization: a review report - ScienceDirect

## Metodología

Síntesis del ligante 1,3,5-tris[(R)-(+)]-feniletilhexahidrotriazina (L)

### Síntesis del clorhidrato de (R)-(+)-α-metil-benzilamina

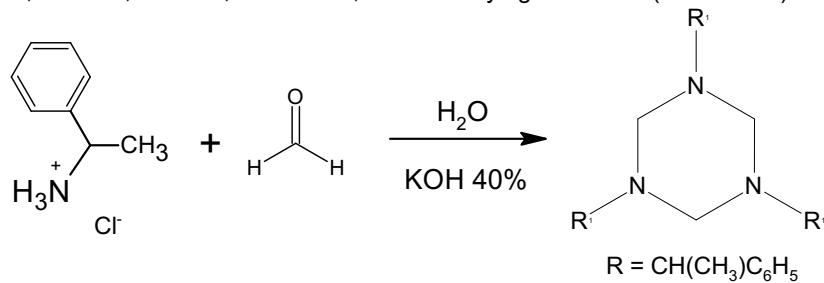
A 10 ml (78.6 mmol) de (R)-(+)-α-metil-benzilamina en solución de 6 ml de etanol al 96%, se adiciona lentamente 15 ml (613 mmol) de ácido clorhídrico (HCl) concentrado. Se agita la solución durante 30 minutos a temperatura ambiente. Se deja evaporar el etanol y se obtienen cristales de color blanco soluble en agua. (Reacción 1)



Reacción 1. Síntesis de clorhidrato de (R)-(+)-α-metil-benzilamina.

### Síntesis del ligante (L)

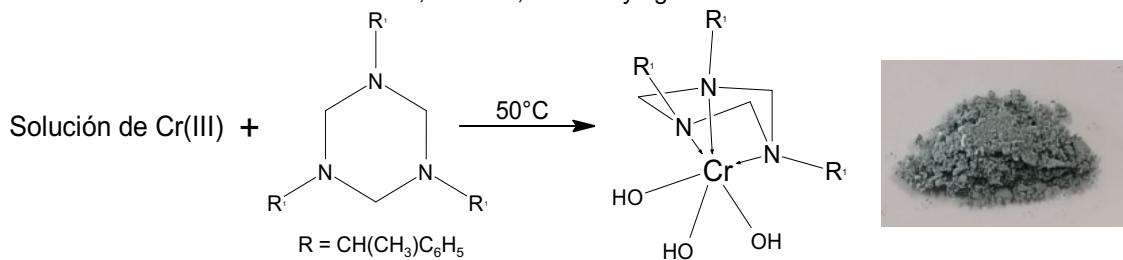
A 1 g (6.34 mmol) del clorhidrato de (R)-(+)-α-metil-benzilamina en solución acuosa se adiciona 0.232 mL (6.30 mmol) de formaldehído (37.2%), la reacción se ajusta a pH=5 con KOH (40%), la reacción se mantiene en agitación constante a temperatura ambiente durante 20 minutos. Se obtiene un sólido color blanco, se filtra al vacío, se realizan 3 lavados con agua destilada y se lleva a sequedad a 80°C. Rendimiento del 10%. Soluble en etanol, metanol, acetona, acetonitrilo, cloroformo y agua a 60°C. (Reacción 2)



Reacción 2. Síntesis del ligante 1,3,5-tris[(R)-(+)]-feniletilhexahidrotriazina.

### Síntesis del complejo [Cr(L)(OH)<sub>3</sub>]

A una solución acuosa de Cr (III), se adiciona lentamente 0.0379 g (0.095 mmol) de ligante (L) en sólido, la solución se mantiene en agitación constante durante 30 minutos a una temperatura de 70°C en baño maría. Se obtiene un sólido color gris-verde. El sólido se filtra al vacío, y se lleva a sequedad a 110°C. Rendimiento 50.43%. Parcialmente soluble en etanol, acetona, metanol y agua.



Reacción 3. Síntesis del complejo [Cr(L)(OH)<sub>3</sub>].

## Determinación de Cromo en las soluciones de Cr (III)

Para la cuantificación de Cr (III) en las muestras problema con Cr (III) y muestras tratadas con el ligante L se empleó la técnica de adición estándar la cual nos permite minimizar los problemas de matriz en las soluciones a cuantificar [8].

### *Preparación de la solución patrón de Cr (VI)*

Se emplea una solución estándar de Cr (III) de 1000 ppm, de la cual se prepara una dilución en agua desionizada a 50 ppm, a continuación, se realiza la oxidación de Cr (III) a Cr (VI) con peróxido de hidrógeno (30% v/V) en medio alcalino (a pH 11) mediante adición de NaOH 1M. Las muestras se oxidan a Cr (VI) con calentamiento (100 rpm) y agitación a 40°C durante 30 minutos. Esta solución preparada fungirá como solución patrón a emplear en la cuantificación.

### *Preparación de las muestras problema y muestras tratadas*

Se toma una alícuota de las muestras problema con Cr (III) y tratadas con el ligante L y se ajusta el pH a 11 con NaOH 1M, a continuación, se agrega peróxido de hidrógeno (30% v/v) en las mismas cantidades empleadas para la preparación de la solución estándar. Se aplica agitación (100 rpm) y calentamiento a 40°C durante 30 minutos.

### *Calibración por el método estándar y cuantificación de las muestras*

Una vez que las muestras y el estándar fueron oxidados a Cr (VI) se realiza la cuantificación mediante el método de difenil carbazida<sup>[9]</sup>, empleando H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2M para ajustar el pH entre 1 y 2. Las muestras problemas son diluidas para que al realizar la lectura no sobrepasen una concentración superior a 2.5 ppm y las muestras tratadas fueron procesadas de forma directa, sin dilución de tal forma que se logre obtener una curva de calibración en un intervalo cercano a 0 ppm y hasta 2.5 ppm.

Primeramente, se prepara una solución de difenil carbazida (DFC) en acetona (300 mg de difenil carbazida, DFC, por 100 ml de acetona). Se toma la muestra de Cr (VI) y se ajusta el pH entre 1 y 2 mediante la adición del H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2M, se añade la solución de DFC y se deja reaccionar por 1 minuto para formar el complejo Cr-DFC, se mide la absorción del complejo coloreado formado a 568 nm en un equipo Bioespectrofotómetro UV-Vis Eppendorf. Se añaden cantidades conocidas de la solución estándar oxidadas a Cr (VI) para determinar la absorbancia con 4 a 5 adiciones realizadas. Con los datos obtenidos se determina la concentración de analito adicionado y se construye la curva de adición estándar (A% vs C<sub>analito</sub>). Con la ecuación de la gráfica se determina la concentración original del analito, dicho valor se encuentra en donde la señal sea 0 (y=0) tomando el valor absoluto para X.

## Oligomerización de etileno

En un reactor tipo Fisher Porter se colocan 0.0122 g (0.027 mmol) del complejo de Cr (III) en solución de 10 ml de etanol absoluto. En línea de vacío se conecta el tanque de etileno para llevar a cabo la reacción. La presión de reacción utilizada es de 2 atmosferas, a una temperatura entre 40-70°C a baño maría con agitación constante. Despues de 10 minutos de reacción se observa una disminución en la presión, se continua la reacción hasta completar 1 hora, sin embargo, la presión ya no disminuyó más. Se retira la reacción, se recupera el complejo de Cr (III) mediante filtración, se evapora el etanol y se lleva a sequedad a 60°C. Se obtiene un producto viscoso, soluble en etanol. Se caracterizó mediante la técnica espectroscópica de FTIR ATR.

<sup>8</sup> Andersen, J. E. T. (2017). The standard addition method revisited. *Trends in Analytical Chemistry*, 89, 21-33. Consultado (julio 2025). <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.12.013>

<sup>9</sup> Doria Herrera, G. M., Paz Ordoñez, P. A., & Hormaza Anagiano, A. (2013). Estandarización de la difenilcarbazida como indicador y acomplejante en la identificación de cromo hexavalente - Cr (VI), Producción + Limpia - Julio - Diciembre de 2013. 8(2), 9-20.

## Resultados

La síntesis del ligante 1,3,5-tris[(R)-(+)]-feniletilhexahidrotriazina (**L**), se llevó a cabo de acuerdo con lo reportado [10,11]. Se obtiene un sólido color blanco soluble en etanol, metano, acetona, acetonitrilo, cloroformo y agua a 60°C, p.f. = 50°C. El ligante se caracterizó mediante RMN  $^1\text{H}$  [12], y FTIR ATR (IR-tracer-100).

En el espectro de FTIR ATR (Figura 1A) no se observa ninguna banda correspondiente a vibración N-H del clorhidrato de (R)-(+)- $\alpha$ -metil-bencilamina, sin embargo, se observan las siguientes bandas significativas de la estructura del ligante: 2927 y 2870  $\text{cm}^{-1}$   $\nu(-\text{CH}_2)$ , y 1140  $\text{cm}^{-1}$   $\nu(\text{C}-\text{N})$ .

### Caracterización del complejo $[\text{Cr}(\text{L})(\text{OH})_3]$

Se obtiene un sólido color gris-verde parcialmente soluble en etanol, metanol, acetona, agua, p.f.=220°C. En el espectro de FTIR ATR (IRTracer-100). (Figura 1B) se observan las bandas correspondientes a vibraciones del ligante L: 2927 y 2870  $\text{cm}^{-1}$   $\nu(-\text{CH}_2)$ , 1138  $\text{cm}^{-1}$   $\nu(\text{C}-\text{N})$ , 3340  $\text{cm}^{-1}$   $\nu(-\text{OH})$  coordinado al centro metálico de Cr (III) y 487  $\text{cm}^{-1}$   $\nu(\text{Cr}-\text{N})$ <sup>[11,13]</sup>.

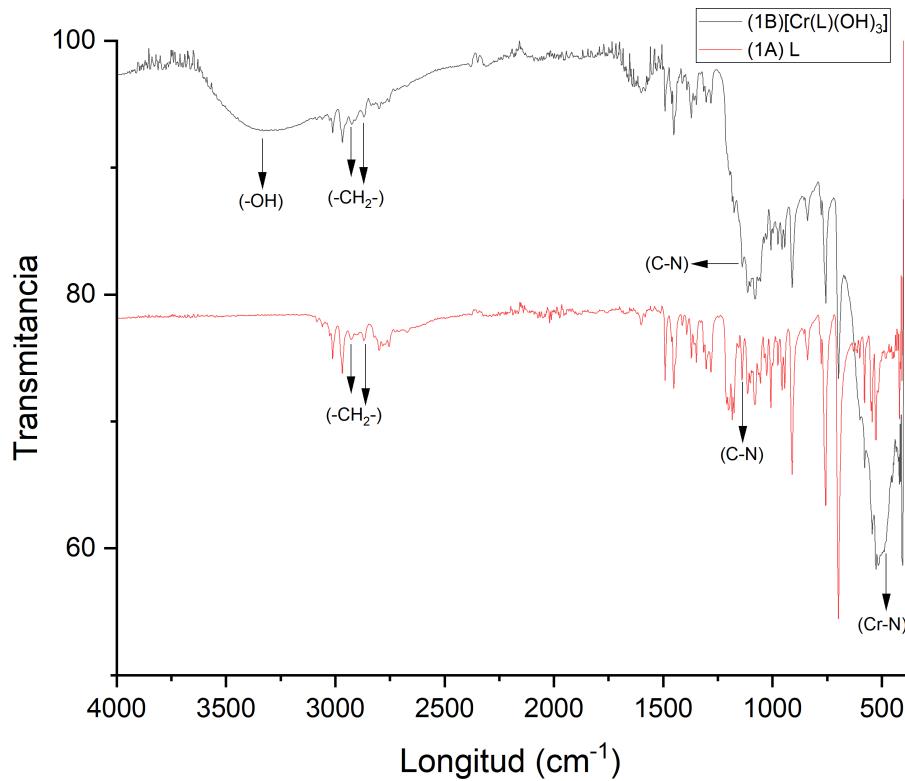


Figura 1. A. Espectro FTIR del ligante (L). B. Espectro FTIR del complejo  $[\text{Cr}(\text{L})(\text{OH})_3]$ .

<sup>10</sup> Martinez, R., Cadenas, G., Contreras, R., & Flores, A. (1995). N-BH<sub>3</sub> adducts of trialkyl-1,3,5-triazacyclohexanes with stable stereogenic nitrogen atoms, stereochemical study. Consultado: julio 2025. [https://doi.org/10.1016/0957-4166\(95\)00202-Z](https://doi.org/10.1016/0957-4166(95)00202-Z).

<sup>11</sup> Jones, A., & Cross, D. (1969). *An introduction to practical infra-red spectroscopy*. ISBN 978-1-4899-6274-4. Consultado: julio 2025.

<sup>12</sup> Ríos, M. (2025). Síntesis y caracterización de ligantes N-donadores derivados de (R)-(+)- $\alpha$ -metil-bencilamina con potencial coordinación a centros de platino (II) (Tesis en proceso). Consultado: julio 2025.

<sup>13</sup> Nakamoto, K. (2009). *Infrared and raman spectra of inorganic and coordination compounds*. ISBN 978-0-471-74493-1. Consultado: julio 2025.

En el espectro de RMN de  $^1\text{H}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 25°C, 500MHz) se observan las señales para la estructura propuesta del ligante (L)  $\delta$ : 1.18 ppm se observa un doblete que integra para 3 H, correspondiente al grupo metilo ( $\text{CH}_3$ ), 3.27 ppm se observa un singulete que integra para 2 H correspondientes al grupo metileno ( $\text{CH}_2$ ), 3.63 ppm como cuadruplete que integra para 1 H asignado al grupo metino ( $\text{CH}$ ), 7.06-7.18 ppm como multiplete que integra para 5 H correspondientes a los hidrógenos aromáticos del grupo fenilo (Figura 2) [13].

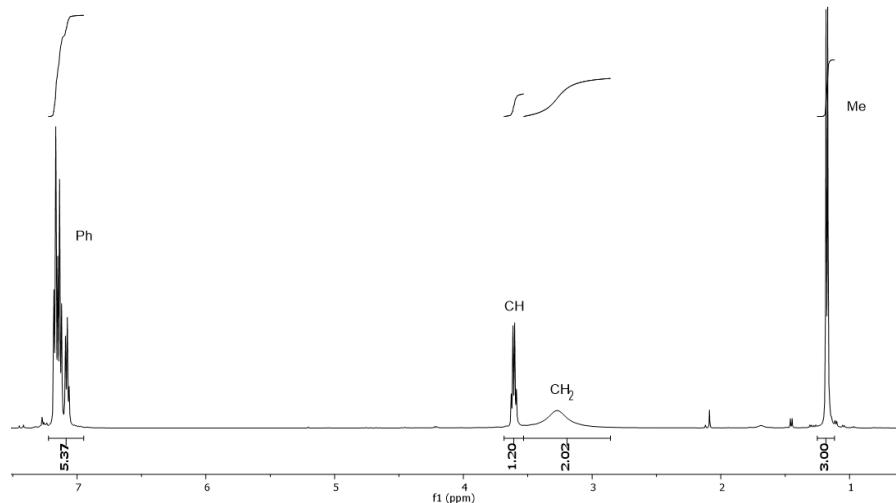


Figura 2. Espectro de RMN de  $^1\text{H}$  ( $\text{CDCl}_3$ , 500MHz) de 1,3,5-tris[(R)-(+)]-fenyletilhezahidrotriazina.

### Determinación de Cr (III) en las muestras problema

La determinación cuantitativa de Cr (III) presente en las muestras, se realizó mediante la oxidación de Cr (III) a Cr (VI) y cuantificando posteriormente la especie oxidada, utilizando el equipo UV-vis BioSpectrometer eppendorf. Los resultados se muestran en la Tabla 1 y Figura 3.

**Tabla 1.** Soluciones de calibración para la cuantificación de Cr (VI) en muestras inicial a tratar por método de adición de estándar. (Curva de calibración).

Solución/Estándar	Cr (VI) 50 mg/L ( $\mu\text{L}$ )	$\text{H}_2\text{SO}_4$ 2 M ( $\mu\text{L}$ )	DFC 0.021 M ( $\mu\text{L}$ )	$\text{H}_2\text{O}$ ( $\mu\text{L}$ )	Concentración final Cr (VI) mg/L
Blanco	0	80	100	3020	0
1	16	80	100	3004	0.227
2	32	80	120	2968	0.455
3	64	80	140	2916	0.909
4	96	80	180	2844	1.364
5	128	80	200	2792	1.818
6	160	80	220	2740	2.273

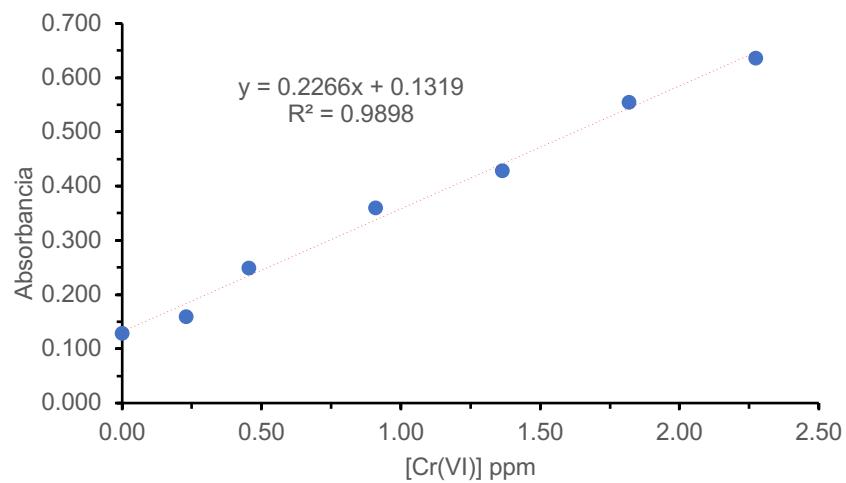


Figura 3. Curva de calibración para la determinación de Cr (VI) en muestras de soluciones de cromo por método de adición estándar.

Aplicando la ecuación de calibración, y el factor de dilución empleado, se obtiene una concentración de Cr(VI) de 433.46 ppm, lo cual corresponde a la concentración de Cr(III) dado que todo el cromo fue oxidado desde su estado (III) al estado (VI).

Por otra parte, las soluciones tratadas fueron empleadas de forma directa, sin dilución, y los valores de absorbancia, así como los volúmenes empleados, se muestran en la Tabla 2 y Figura 4.

**Tabla 2.** Proporciones de reactivos y muestras empleadas en la cuantificación de Cr (VI) para las muestras tratadas.

Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4	Celda 5
ST= 400 $\mu$ L				
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 150 $\mu$ L	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 150 $\mu$ L	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 150 $\mu$ L	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 150 $\mu$ L	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> = 150 $\mu$ L
DFC= 200 $\mu$ L				
	Est.= 20 $\mu$ L	Est.= 40 $\mu$ L	Est.= 60 $\mu$ L	Est.= 80 $\mu$ L
H <sub>2</sub> O= 2550 $\mu$ L	H <sub>2</sub> O= 2430 $\mu$ L	H <sub>2</sub> O= 2410 $\mu$ L	H <sub>2</sub> O= 2390 $\mu$ L	H <sub>2</sub> O= 2370 $\mu$ L
Absorción				
-0.009	0.091	0.147	0.244	0.299
Concentración				
0	0.284	0.568	0.852	1.136

ST: solución tratada; Est: estándar

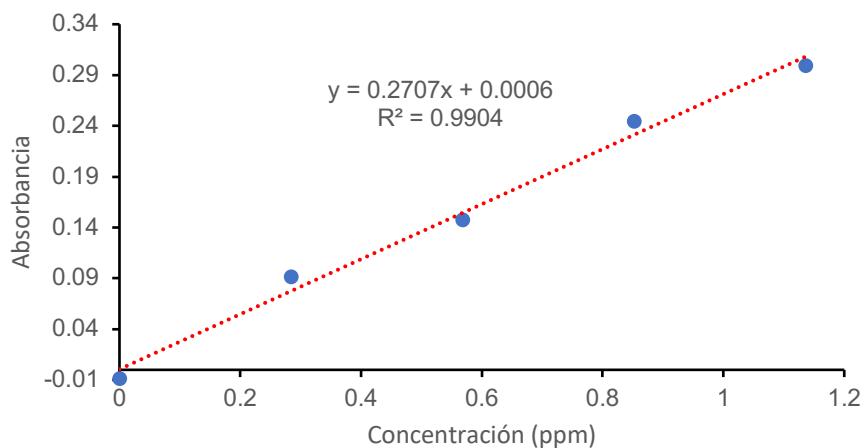


Figura 4. Curva de calibración para la determinación de Cr (VI) en muestras tratadas por método de adición estándar.

Se realizó por triplicado la muestra de aguas tratadas con una concentración de  $9 \times 10^{-3}$  M del ligante con respecto a la solución de Cr (III) en la que se realiza la síntesis, las cantidades fueron las mismas, por ende, solo se promediaron las concentraciones de las tres muestras (Figura 5), el cual fue igual a 0.067 ppm, por lo tanto, el porcentaje de remoción es:

$$\% \text{Remoción} = \frac{433.46 \text{ ppm} - 0.067 \text{ ppm}}{433.46 \text{ ppm}} * 100 = 99.98\%$$

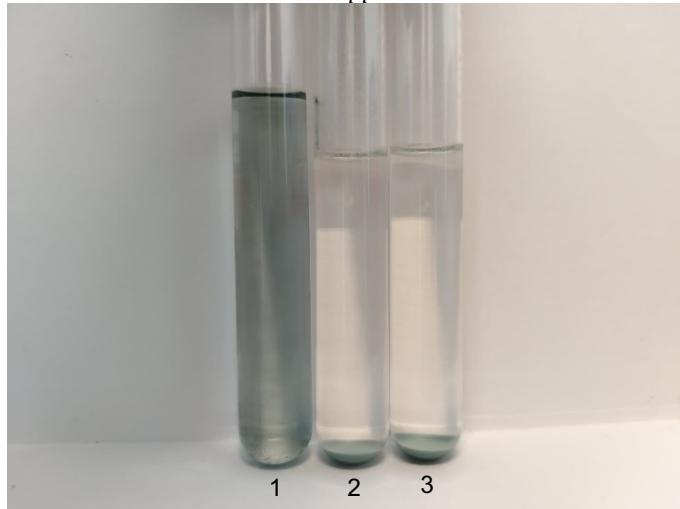


Figura 5. Muestra problema con Cr (III), 2 y 3 con el ligante heterocíclico.

### Aplicaciones del complejo $[\text{Cr}(\text{L})(\text{OH})_3]$

#### *El complejo $[\text{Cr}(\text{L})(\text{OH})_3]$ : Catalizador en el proceso de oligomerización de etileno*

El complejo  $[\text{Cr}(\text{L})(\text{OH})_3]$  parcialmente soluble en etanol absoluto, se utilizó como catalizador en el proceso de oligomerización de etileno, empleando una línea de vacío para eliminación del oxígeno en el medio de reacción y, manteniendo una presión de 2 atmósferas con el etileno, en agitación constante y temperatura de 40°C, durante 1 hora, Figura 6. Después de recuperar el complejo (catalizador) mediante filtración y evaporación el etanol, se obtiene un producto viscoso el cual se caracterizó mediante FTIR ATR, Figura 7, en donde se observan las bandas:  $1645 \text{ cm}^{-1} \nu(\text{C}=\text{C})$ ,  $918 \text{ cm}^{-1} \nu(\text{CH}_2)$ .



Figura 6. Proceso de oligomerización de etileno.

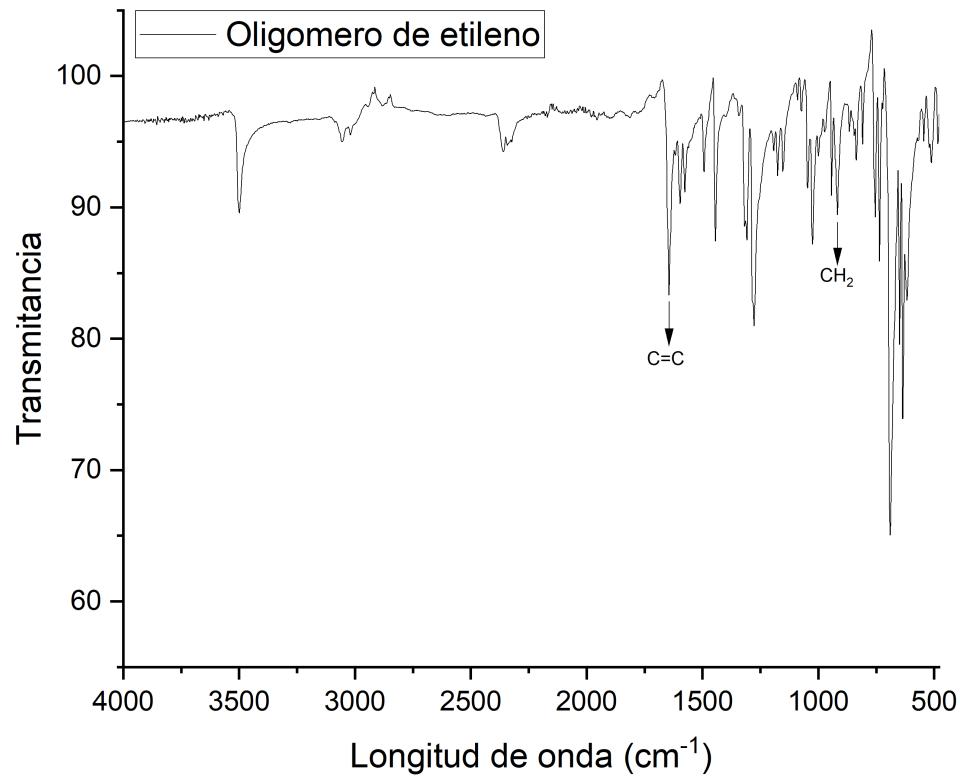


Figura 7. Espectro FTIR ATR del producto de oligomerización de etileno.

## Discusión

Los resultados espectroscópicos obtenidos y cotejados con los datos espectroscópicos tanto del ligante como del complejo de Cr (III) corresponden a los esperados de acuerdo con la estructura química propuesta; se observan bandas correspondientes a aminas terciarias, metilos y metilenos, así como la vibración metálica de Cr-N. Los porcentajes de rendimiento de síntesis son satisfactorios; sin embargo, lo observado en el proceso de aplicación del complejo metálico como catalizador, oligomerización de etileno, indica que es necesario realizar una purificación mayor el producto ya que se observan bandas de impurezas o reacciones secundarias. Aunque durante la parte inicial de la reacción de oligomerización se observa una ligera disminución de la presión del sistema, aproximadamente los 10 minutos iniciales de reacción, la reacción no sigue procediendo por lo que se debe continuar estudiando la parte de catálisis del complejo, para ello se propone realizar cinéticas a diferentes presiones y temperaturas. Respecto a la remoción de Cr (III), los porcentajes de remoción son excelentes logrando remover más del 99.9% del cromo inicial en la solución efluente, indicando que es posible realizar la síntesis del complejo deseado y, al mismo tiempo, realizar un eficiente tratamiento de la solución efluente.

## Conclusión

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de sintetizar compuestos heterocíclicos tipo triazaciclohexano con capacidad para formar complejos con Cr (III), permitiendo su extracción de soluciones efluentes acuosas. La incorporación de nuevos complejos de coordinación en procesos circulares tiende a ser un potencial en la transformación de residuos y minimizar el impacto ambiental, la valorización de los productos obtenidos puede impulsar modelos de negocio sostenibles que estén enfocados a los principios de la economía circular.

## Agradecimientos

Dr. Crispín Silviano Cristobal Gasga, Universidad de Guanajuato, DCNE. Por las facilidades y apoyo para realizar las reacciones de oligomerización.

## Bibliografía/Referencias

- Agenda 2030. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Consultado (julio 2025). <https://www.un.org/es/actnow/>
- Posición de Guanajuato en la producción industrial nacional INEGI. Consultado (julio de 2025). <https://www.inegi.org.mx/temas/manufacturas/>
- Agencia para sustancias tóxicas y registro de enfermedades. Consultado (julio 2025). [https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es\\_tfacts7.html](https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts7.html)
- Secretaría de medio ambiente y recursos naturales. (2006). Establecimiento de las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos (NOM-052-SEMARNAT-2005). Consultado (julio 2025). Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005
- Diario oficial. (2022). Establecimiento de los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. (NOM-001-SEMARNART-2021). Consultado (julio 2025). semarnat001-2022\_03.pdf
- Catalizador de Phillips y su empleo para la obtención de copolímeros de etileno-alfa-olefinas, Patente ES2101143T3. Consultado (julio 2025). <https://patents.google.com/patent/ES2101143T3/es>
- Kumar, A., Dholakiya, B., & Jangir, R. (2021). *Role of organometallic complexes in olefin polymerization*. Consultado (julio 2025). Role of organometallic complexes in olefin polymerization: a review report - ScienceDirect
- Andersen J. E. T. (2017). The standard addition method revisited. Trends in Analytical Chemistry, 89, 21-33. Consultado (julio 2025). <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.12.013>

Doria Herrera, G. M., Paz Ordoñez, P. A., & Hormaza Anaguano, A. (2013). Estandarización de la difenilcarbazida como indicador y acomplejante en la identificación de cromo hexavalente – Cr (VI), Producción + Limpia - Julio - Diciembre de 2013. 8(2), 9-20.

Martinez, R., Cadenas, G., Contreras, R., & Flores, A. (1995). N-BH<sub>3</sub> adducts of trialkyl-1,3,5-triazacyclohexanes with stable stereogenic nitrogen atoms, stereochemical study. Consultado: julio 2025. [https://doi.org/10.1016/0957-4166\(95\)00202-Z](https://doi.org/10.1016/0957-4166(95)00202-Z).

Jones, A., & Cross, D. (1969). *An introduction to practical infra-red spectroscopy*. ISBN 978-1-4899-6274-4  
Consultado: julio 2025

Ríos, M. (2025). Síntesis y caracterización de ligantes N-donadores derivados de (R)-(+)-α-metil-bencilamina con potencial coordinación a centros de platino (II). Consultado: julio 2025.

Nakamoto, K. (2009). Infrared and raman spectra of inorganic and coordination compounds. ISBN 978-0-471-74493-1. Consultado: julio 2025.