Carbonatos cíclicos: aprovechamiento del CO_2 en la obtención de solventes verdes

Jesús Alonso Cruz Valdez[1],*, Valvanuz Cahuantzi[2], Rosalba Patiño-Herrera[2], José Elías Pérez López[3]

Resumen

La demanda progresiva de productos derivados de hidrocarburos ha provocado un aumento en las emisiones de CO_2, las cuales son causantes directas del calentamiento global. Sin embargo, una alternativa para el aprovechamiento del CO_2, es su uso como reactivo para la síntesis de carbonatos cíclicos como productos valiosos. Debido a su baja toxicidad, alta biodegradabilidad, bajo costo de producción y versatilidad de aplicaciones, los carbonatos cíclicos han sido catalogados como solventes verdes, entre los que se destacan el carbonato de propileno, carbonato de etileno y carbonato de glicerol. El presente trabajo es una breve revisión bibliográfica sobre la síntesis de los carbonatos cíclicos más destacados, sus propiedades fisicoquímicas, principales usos y panorama actual en el mercado.

Palabras clave: carbonatos cíclicos, aprovechamiento del CO_2, biodegradabilidad.

Introducción

En décadas recientes, el crecimiento acelerado de la población ha provocado un aumento en el consumo de hidrocarburos provenientes del petróleo crudo (p. ej. n-octano, propano y benceno), los cuales son materia prima para la obtención de energía, textiles, medicamentos y demás productos de uso cotidiano. Aproximadamente, el 80 % del suministro energético mundial es generado a partir de la combustión de diésel o gas natural (Lopes *et al.*, 2020), los cuales son una mezcla de hidrocarburos. Mientras que la oferta del polipropileno, el segundo polímero más utilizado para la elaboración de plásticos (sólo detrás del polietileno), muestra un consumo estimado de 135 millones de toneladas de propileno en 2025 (Cruz-Valdez *et al.*, 2022), el cual es producido por el craqueo térmico del propano. Ambos casos tienen características en común ya que requieren de un elevado consumo energético para su transformación y purificación, provocando un aumento en las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico.

A finales de la década de 1990, diversos estudios enfatizaron que el incremento de emisiones de CO_2 está directamente relacionado con el calentamiento global (Büttner *et al.*, 2017). En el año 2015, los niveles diarios promedio de CO_2 superaron las 400 ppm (Büttner *et al.*, 2017). Esta problemática socioambiental tiene consecuencias negativas, tales como: derretimiento de casquetes polares, aumento del nivel del mar, alteración de los ciclos pluviales, sequías, escasez de agua dulce, y contaminación del aire (Lopes *et al.*, 2020). Por otra parte, dado que el CO_2 es un material altamente disponible, económico, no toxico, ni inflamable (Büttner *et al.*, 2017), su captura, almacenamiento y uso como materia prima ha ganado importancia como alternativa para la mitigación de gases de efecto invernadero y la obtención de productos de alto valor agregado, como son los carbonatos cíclicos (Santiago *et al.*, 2021).

Síntesis y propiedades de los carbonatos cíclicos

Las rutas más comunes para la producción a escala industrial de los carbonatos cíclicos más utilizados (carbonato de propileno, carbonato de etileno y carbonato de glicerol), es mediante la cicloadición de CO_2 con epóxidos y dioles (Pescarmona, 2021; Rollin *et al.*, 2021). La Figura 1 muestra la síntesis para la producción de carbonato de propileno y carbonato de etileno; en las cuales, se utilizan como epóxidos reactantes al óxido de propileno y al óxido de etileno (Pescarmona, 2021), respectivamente. En las reacciones anteriormente mencionadas existe una eficiencia de conversión del 100%. Asimsimo, la Figura 1 describe la síntesis para la producción de carbonato de glicerol, en la cual se utiliza como diol reactante al glicerol (Rollin *et al.*, 2021). Sin embargo, esta ruta no es eficiente para la producción de carbonato de glicerol; por lo tanto, una alternativa es la reacción conjunta de óxido de propileno, CO_2 y glicerol (Alassmy *et al.*, 2021).

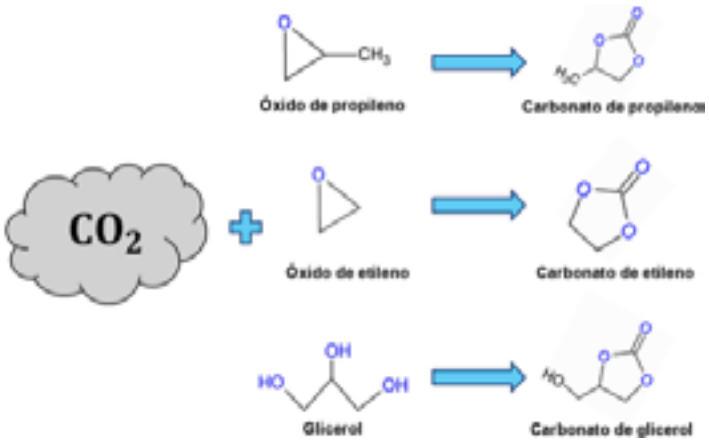


Figura 1. Síntesis de carbonatos cíclicos vía cicloadición de CO_2, epóxidos y dioles como reactivos. **Fuente:** elaboración propia.

[1]Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. [2]Departamento de Ingeniería Química, Tecnológico Nacional de México en Celaya. [3]Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
*jesus.cruz@iqcelaya.itc.mx

La Tabla 1 muestra las principales características y propiedades fisicoquímicas del carbonato de propileno, carbonato de etileno y carbonato de glicerol; entre ellas, destacan su baja toxicidad y ecotoxicidad, baja viscosidad y volatilidad, bajo costo de producción y alta biodegradabilidad (Ayuso *et al.*, 2023). Asimismo, al ser solventes de fácil separación y reciclaje, poseer temperaturas de ebullición elevadas, y tener características polares apróticas (en los carbonatos de etileno y propileno) (Ayuso *et al.*, 2023), estas sustancias son utilizadas como solventes en procesos de extracción; donde la alta miscibilidad del carbonato de etileno y del carbonato de propileno con el benceno y el etanol, resulta favorable para el diseño de procesos de destilación extractiva y extracción líquido-líquido.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los carbonatos cíclicos más utilizados en procesos industriales (Sonnati *et al.*, 2013; Pescarmona, 2021).

Propiedades fisicoquímicas	Solventes verdes		
	Carbonato de propileno	Carbonato de etileno	Carbonato de glicerol
Fórmula química	$C_4H_6O_3$	$C_3H_4O_3$	$C_4H_6O_4$
Peso molecular, [g/mol]	102.090	88.063	118.088
Temperatura de fusión, [°C]	-49	36	-69
Temperatura de ebullición, [°C]	242	248	160 (a 0.8 mmHg)
Temperatura de inflamación, [°C]	135	143	190
Densidad, [g/cm³]	1.2047 (20 °C)	1.3214 (39 °C)	1.4
Viscosidad, [mPa s]	2.53 (25 °C)	1.93 (40 °C)	85.4 (25 °C)
Entalpía de formación, [kJ/mol]	-613.2 (25 °C)	-581.6 (25 °C)	n.a.
Capacidad calorífica, [J/mol·°C]	218.6 (25 °C)	133.9 (50 °C)	n.a.
Solubilidad a 20 °C	Miscible en agua, etanol, acetona y benceno	Miscible en agua, etanol, ácido acético y benceno	Miscible en agua
Riesgo a la salud	Causa irritación en ojos	Nocivo si se ingiere	Sin información reportada

Principales usos de los carbonatos cíclicos

Reacciones de descarboxilación

La reacción de descarboxilación del carbonato de glicerol es un método típico para la obtención de 1,2-anhidroglicerol (glicidol), como producto deseado, y CO_2 como impureza. En la Figura 2 se muestra la ruta cinética propuesta por Choi *et al.* (2013) en la cual, a 175 °C, 0.026 atm de presión, 30 minutos de reacción y utilizando líquidos iónicos (ILs) como catalizadores, se obtiene una conversión máxima del 98 %. El glicidol tiene una amplia variedad de aplicaciones industriales, tales como: recubrimiento de superficies, agente de gelación en solidos propulsores, estabilizador para aceites naturales y polímeros vinílicos, y como separador de emulsiones (demulsificante) (Rollin *et al.*, 2021). Asimismo, es utilizado como intermediario en la síntesis de ésteres y aminas, siendo de alto valor agregado para la producción de resinas epóxicas y poliuretanos (Rollin *et al.*, 2021).

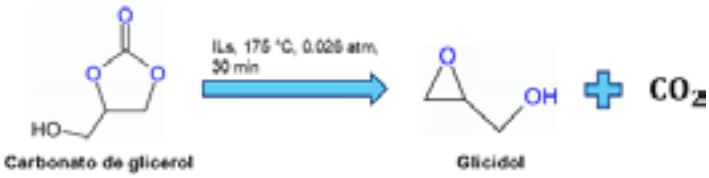


Figura 2. Síntesis de glicidol vía descarboxilación de carbonato de glicerol. **Fuente:** elaboración propia.

Reacciones de transesterificación

La reacción de transesterificación de carbonato de etileno con metanol, para la producción de dimetil carbonato (DMC), ha emergido como una alternativa a la reacción establecida de fosfógeno con metanol, dado que el fosfógeno es un compuesto altamente tóxico y corrosivo (Tomishige *et al.*, 2004). La Figura 3 muestra la síntesis propuesta por Lee *et al.* (2016) para la producción de DMC vía transesterificación de carbonato de etileno con exceso de metanol, en la cual, a 100 °C, 4 h de reacción, y utilizando [IL]OH soportado en espuma celular mesoporosa (MCF), como catalizador heterogéneo, existe una conversión de DMC del 77 %, con bajas impurezas de metanol como subproducto. Debido a su alto contenido de oxígeno, baja toxicidad, alta estabilidad química, y rápida biodegradabilidad, el DMC es utilizado como aditivo en la gasolina e intermediario químico en la industria polimérica (Rollin *et al.*, 2021).

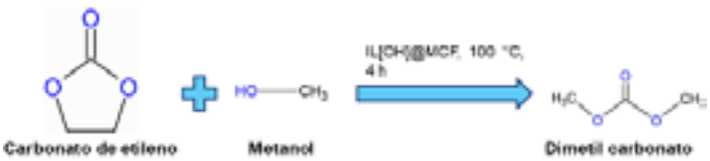


Figura 3. Síntesis de dimetil carbonato (DMC) vía transesterificación de carbonato de metileno con metanol. **Fuente:** elaboración propia.

Producción de poliuretanos

Los poliuretanos son un grupo de materiales valiosos que tienen una gran variedad de aplicaciones en los sectores industrial y doméstico. La demanda de poliuretanos fue de 24 Mton (megatoneladas) en 2020, representando el 6 % de todos los plásticos producidos cada año (Rollin *et al.*, 2021). Algunos tipos de poliuretanos, como las espumas rígidas y flexibles, elastómeros, adhesivos y recubrimientos, son ampliamente manufacturados y utilizados como suelas de calzado, componentes para recubrimientos eléctricos, e implantes médicos utilizados en cirugía (Suyarwanshi *et al.*, 2018). La ruta tradicional para la síntesis de poliuretanos es mediante la reacción de isocianatos con alcoholes. Sin embargo, los isocianatos son compuestos cancerígenos y mutagénicos, dado que son producto de la reacción de fosfógeno con sales de amina (Rollin *et al.*, 2021). Una ruta alterna y ecológica para la producción de poliuretanos sin isocianatos (Non-isocyanate polyurethanes, NIPU por sus siglas en inglés) es mediante la reacción de adición de diaminas con carbonatos cíclicos de cinco o seis miembros (Pescarmona, 2021). En la Figura 4 se muestra dicha reacción, que da como resultado dos isómeros, cada uno conteniendo un grupo uretano e hidroxilo (Kathalewar *et al.*,2013). Donde un isómero tiene un grupo β-hidroxilo secundario, y el otro un grupo hidroximetil (Kathalewar *et al.*, 2013). Estos grupos hidroxilo tienen la capacidad de formar puentes de hidrógeno intermoleculares con el grupo uretano, proporcionando una resistencia química dos veces superior, en comparación con poliuretanos convencionales (Kathalewar *et al.*, 2013).

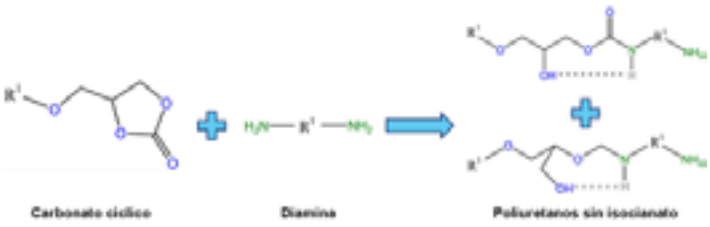


Figura 4. Síntesis de poliuretanos sin isocianatos (NIPU) vía adición de diaminas con carbonatos cíclicos. **Fuente:** elaboración propia.

Dispositivos electrónicos

Por cuestiones de seguridad, para un mejor desarrollo de las baterías de iones de litio utilizadas en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos, es importante preparar materiales menos inflamables. Debido a las altas purezas de los carbonatos de etileno y propileno, su buena conductividad de iones de litio a temperatura ambiente, y elevada constante dieléctrica, necesaria para la disolución de sales de litio, estos solventes son adecuados para la generación de electrólitos conductores (Pescarmona, 2021).

Procesos de desaromatización de hidrocarburos

Los ILs y los solventes eutécticos profundos (DESs), a pesar de ser catalogados como solventes verdes, requieren de múltiples pasos de síntesis que generan una gran cantidad de residuos, tienen altas viscosidades y densidades, su alta higroscopicidad puede provocar corrosión, sus costos de producción son elevados, y su regeneración a altas temperaturas puede incrementar su descomposición y volatilidad (Cruz Valdez *et al.*, 2025). Debido a estas estas razones, actualmente los ILs y los DESs no son una alternativa real de aplicación industrial. Dado que, el carbonato de propileno tiene un bajo costo de producción, y polaridad aprótica, ha emergido como un solvente alternativo en procesos de destilación extractiva para la separación de mezclas n-hexano/benceno. En este caso, el carbonato de propileno al tener una elevada solubilidad y selectividad con el benceno, permite extraerlo del n-hexano, obteniendo elevadas purezas de n-hexano, y una completa recuperación del benceno (Cruz Valdez *et al.*, 2025).

Mercado internacional de los carbonatos cíclicos

De acuerdo con la amplia variedad de aplicaciones industriales de los carbonatos cíclicos, su demanda incrementará durante los próximos años. En el 2024, la demanda de carbonato de glicerol fue de $2.23 billones de dólares, de los cuales se espera un incremento de $3.85 billones de dólares para el 2034, teniendo una expectativa de Tasa de Crecimiento Anual Compuesta (TCAC) del 5.63% durante el periodo 2024-2034. El carbonato de propileno tuvo un valor de mercado de $0.45 billones de dólares en el 2023, mostrando un crecimiento proyectado de $0.62 billones de dólares para el 2030, exhibiendo una TCAC del 5.05% en el periodo 2023-2030. Mientras que, en el 2024 la demanda del carbonato de etileno fue de $0.84 billones de dólares, alcanzando una proyección de $1.5 billones de dólares para el 2029, teniendo un crecimiento del TCAC del 14.4% durante el periodo 2024-2029. Sin embargo, a pesar del alto valor agregado de estos carbonatos cíclicos, se estima que la producción global anual es de 100 kton/año (kilotoneladas/año), siendo significativamente menor a las 37,000 kton/año de emisiones de CO_2 (Pescarmona, 2021).

Conclusiones

Los carbonatos cíclicos, obtenidos a partir de emisiones de CO_2, han emergido como nuevos solventes verdes debido a su bajo costo de producción, baja toxicidad y ecotoxicidad. Asimismo, debido a la disposición y elevada eficiencia atómica del CO_2, la producción de carbonatos cíclicos favorece a la mitigación de gases de efecto invernadero, mientras se obtienen productos de alto valor agregado. En este caso, los carbonatos cíclicos tienen una amplia versatilidad de aplicaciones, desde ser utilizados en procesos de extracción de hidrocarburos, hasta ser usados como reactantes en procesos de descarboxilación y transesterificación. Por lo tanto, son un importante tema de investigación para su desarrollo y aplicación en diversas áreas; dado que, su demanda seguirá incrementando durante los próximos años.

Bibliografía

1. Lopes, E.J.C., Ribeiro, A.P.C., Martins, L.M.R.S. New trends in the conversion of CO_2 to cyclic carbonates. *Catalysts*. **2020**, 10(*5*), 479. https://doi.org/10.3390/catal10050479
2. Cruz-Valdez, J.A., Patiño-Herrera, R., González-Alatorre, G., Louvier-Hernández, J.F., Avilés Martínez, A., Pérez, E. Decrease in CO_2 emissions in obtaining polymer-grade propylene by extractive distillation. *Chem. Eng. Technol.* **2022**, 45(*9*), 1571-1580. https://doi.org/10.1002/ceat.202200110

3. Büttnerr, H., Longwitz, L., Steinbauer, J. Recent developments in the synthesis of cyclic carbonates from epoxides and CO_2. *Top Curr. Chem. (Z)*. **2015**, 375, 50. https://doi.org/10.1007/s41061-017-0136-5

4. Santiago, R., Moya, C., Hernández,, E., Cojocaru, A-V., Navarro, P., Palomar, J. Extending the ability of cyclic carbonates for extracting BTEX to challenging low aromatic content naphtha: the designer solvent role at process scale. *Computers & Chemical Engineering*. **2021**, 154, 107468. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107468

5. Pescarmona, P.P. Cyclic carbonates synthesised from CO_2: applications, challenges and recent research trends. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. **2021**, 29, 100457. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100457

6. Rollin, P., Soares, L.K., Barcellos, A.M., Araujo, D.R., Lenardão, E.J., Jacob, R.G., Perin, G. Five-membered cyclic carbonates: versatility for applications in organic synthesis, pharmaceutical, and materials sciences. *Appl. Sci.* **2021**, 11, 5024. https://doi.org/10.3390/app11115024

7. Alassmy, Y.A., Paalman, P.J., Pescarmona, P.P. One-pot fixation of CO_2 into glycerol carbonate using ion-exchanged amberlite resin beads as efficient metal-free heterogeneous catalysts. *ChemCatChem*. **2021**, 13(*1*), 475-486. https://doi.org/10.1002/cctc.202001632

8. Ayuso, M., Mateo, S., Belinchón, A., Navarro, P., Palomar, J., García, J., y Rodriguez, F. Cyclic carbonates as solvents in the dearomatization of refinery streams: experimental liquid-liquid equilibria, modelling, and simulation. *J. Mol. Liq.* **2023**, 380, 121710. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121710

9. Sonnati, M.O., Amigoni, S., Taffin de Givenchy, E.P., Darmanin, T., Choulet, O., Guittard, F. Glycerol carbonate as a versatile building block for tomorrow: synthesis, reactivity, properties and applications. *Green Chem*. **2013**, 15, 283-306. https://doi.org/10.1039/C2GC36525A

10. Choi, J.S., Simanjuntaka, F.S.H., Oh, J.H., Lee, K.I., Lee, S.D., Cheong, M., Kim, H.S., Lee, H. Ionic-liquid-catalyzed decarboxylation of glycerol carbonate to glycidol. *J. Catal.* **2013**, 297, 248–255. https://doi.org/10.1016/j.jcat.2012.10.015

11. Tomishige, K., Yasuda, H., Nurunnabi, M., Li, B., Kunimoru, K. Selective formation of ethylene carbonate from ethylene glycol and carbon dioxide over CeO_2-ZrO_2 solid solution catalysts. *Studies in Surface Science and Catalysis*. **2004**, 153, 165-168. https://doi.org/10.1016/S0167-2991(04)80239-8

12. Lee, K.-H., Lee, S., Shin, D., Hahm, H.-S. Dimethyl carbonate synthesis via transesterification of ethylene carbonate and methanol using ionic liquid catalysts immobilized on mesoporous cellular foams. *Res. Chem. Intermed*. **2016**, 42, 109–121. https://doi.org/10.1007/s11164-015-2396-4

13. Suryawanshi, Y., Sanap, P., Wani, V. Advances in the synthesis of non-isocyanate polyurethanes. *Polym. Bull*. **2018**, 76, 3233–3246. https://doi.org/10.1007/s00289-018-2531-7

14. Kathalewar, M.S., Joshi, P.B., Sabnis, A.S., Malshe, V.C. Non-isocyanate polyurethanes: from chemistry to applications. *RSC Adv*. **2013**, 3, 4110-4129. https://doi.org/10.1039/C2RA21938G

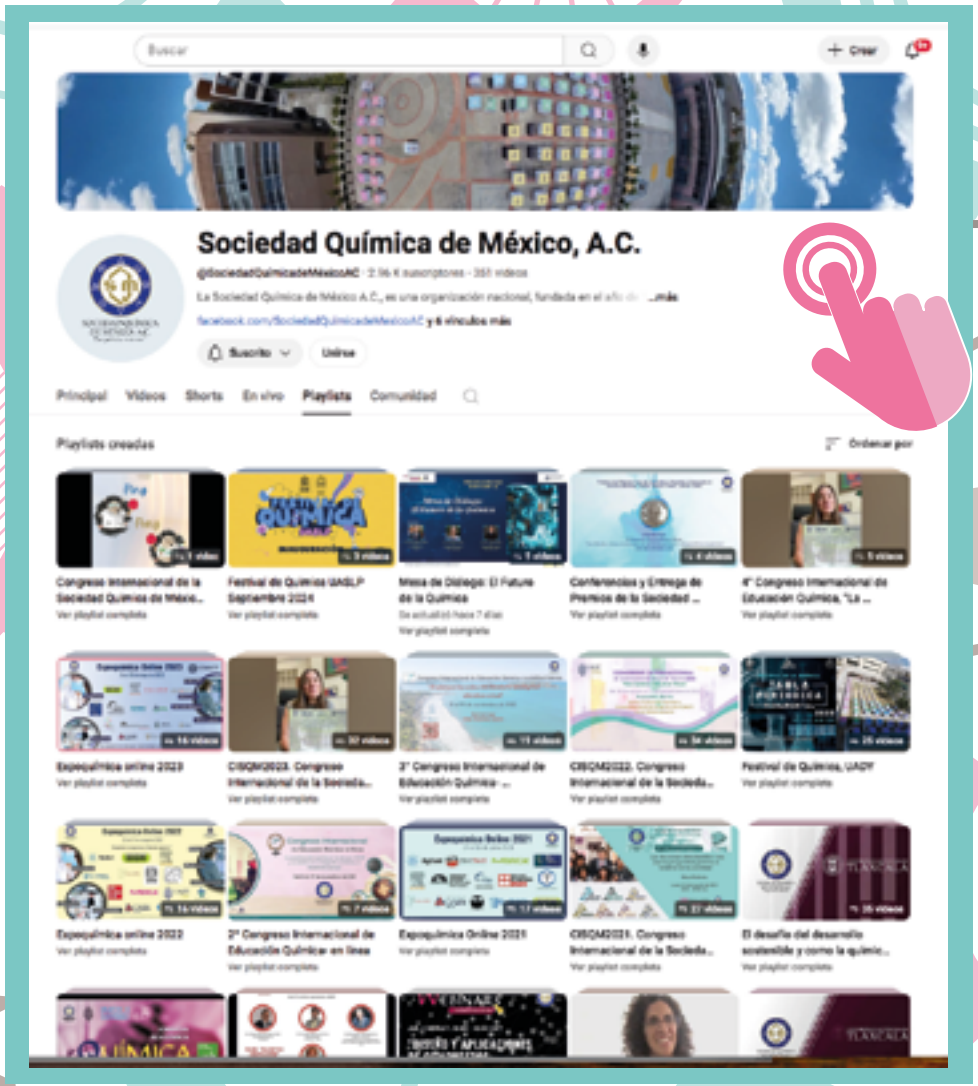
15. Cruz Valdez, J.A., Patiño-Herrera, R., Avilés Martínez, A., Barajas-Villarruel, L.R., Pérez, E. Energy-economic purification of n-hexane from low benzene concentrations via extractive distillation with propylene carbonate as solvent: a comparative study with liquid-liquid extraction processes. *Sep. Purif. Technol*. **2025**, 361(1), 131348. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131348

16. Market Research Future. Glycerol Carbonate Market. Disponible en: https://www.marketresearchfuture.com/reports/glycerol-carbonate-market-26072 (Consultado el 07/05/2025)

17. Market Research Future. Propylene Carbonate Market. Disponible en: https://www.marketresearchfuture.com/reports/propylene-carbonate-market-8089 (Consultado el 07/05/2025)

18. Markets and Markets. Ethylene Carbonate Market. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/ethylene-carbonate-market-229766138.html (Consultado el 07/05/2025)

Suscríbete a nuestro canal de You Tube



"La química nos une"

www.sqm.org.mx
soquimex@sqm.org.mx