

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**OBTENCIÓN DE BENCENO, TOLUENO Y XILENOS A
PARTIR DE METANOL: TECNOLOGÍAS Y ANÁLISIS
PRELIMINAR DE LA SITUACIÓN DEL MERCADO**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar por el grado de bachiller en Ingeniería Química

AUTOR:

Arturo Alfredo Arias Aguilar (ORCID: 0000-0001-8239-9139)

ASESOR:

Francisco Tarazona Vásquez (ORCID: 0000-0003-1852-9335)

Lima – Perú

2020

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO I: OBJETIVOS	13
1.1. Objetivo general.....	13
1.2. Objetivos específicos	14
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	14
2.1. Benceno, producción y aplicaciones.....	14
2.2. Tolueno, producción y aplicaciones	15
2.3. Xilenos, producción y aplicaciones	16
2.4. Metanol y sus aplicaciones	18
2.5. Reacción química de metanol a aromáticos.....	19
2.6. Zeolitas ZSM-5	20
CAPÍTULO III: TECNOLOGÍAS DE OBTENCIÓN DE BENCENO, TOLUENO Y XILENOS A PARTIR DE METANOL.....	20
3.1. Catalizadores.....	20
3.2. Estudios cinéticos.....	23
3.3. Antecedentes a escala industrial y de diseño de procesos	26
3.3.2. Procesos de producción de benceno, tolueno y xilenos a partir de metanol	26
3.4. Procesos alternativos de producción de benceno, tolueno y xilenos	28
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA SITUACIÓN DEL MERCADO	30
4.1. Valor de las importaciones y exportaciones	31
4.2. Evolución de los mercados	33

4.3.	Principales países comercializadores de benceno, tolueno y xilenos	36
4.3.1.	Principales exportadores e importadores en Asia	45
4.3.2.	Principales exportadores e importadores en Europa	53
4.3.3.	Principales exportadores e importadores en América del Norte y Central ..	61
4.3.4.	Principales exportadores e importadores en América del Sur.....	68
4.3.5.	Principales exportadores e importadores en África.....	73
4.3.6.	Principales exportadores e importadores en Oceanía.....	80
4.4.	Precios del benceno, el tolueno y los xilenos	83
4.5.	Principales fuentes y precios de metanol.....	83
CONCLUSIONES		85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		87
ANEXOS.....		92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Resumen de catalizadores óptimos de cada estudio en función de su selectividad para compuestos aromáticos.....	23
Tabla 3.2. Efecto de la actividad del catalizador ZSM-5 modificado en la conversión y a selectividad de los aromáticos.	25
Tabla 3.3. Materias primas alternativas para la obtención de aromáticos y sus selectividades.....	30
Tabla 4.1. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en Asia representan respecto al total mundial.....	46
Tabla 4.2. Mayores exportadores e importadores de benceno de Asia (2018).....	47
Tabla 4.3. Mayores exportadores e importadores de tolueno de Asia (2018).....	48
Tabla 4.4. Mayores exportadores e importadores de <i>o</i> -xileno de Asia (2018).....	49
Tabla 4.5. Mayores exportadores e importadores de <i>m</i> -xileno de Asia (2018).....	50
Tabla 4.6. Mayores exportadores e importadores de <i>p</i> -xileno de Asia (2018).....	51
Tabla 4.7. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de Asia (2018).	52
Tabla 4.8. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en Europa representan respecto al total mundial.	54
Tabla 4.9. Mayores exportadores e importadores de benceno de Europa (2018).	55
Tabla 4.10. Mayores exportadores e importadores de tolueno de Europa (2018).....	56
Tabla 4.11. Mayores exportadores e importadores de <i>o</i> -xileno de Europa (2018).	57
Tabla 4.12. Mayores exportadores e importadores de <i>m</i> -xileno de Europa (2018).....	58
Tabla 4.13. Mayores exportadores e importadores de <i>p</i> -xileno de Europa (2018).	59
Tabla 4.14. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de Europa (2018).....	60

Tabla 4.15. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en América del Norte y Central representan respecto al total mundial.	62
Tabla 4.16. Mayores exportadores e importadores de benceno de América del Norte y Central (2018).....	63
Tabla 4.17. Mayores exportadores e importadores de tolueno de América del Norte y Central (2018).....	64
Tabla 4.18. Mayores exportadores e importadores de <i>o</i> -xileno de América del Norte y Central (2018).....	65
Tabla 4.19. Mayores exportadores e importadores de <i>m</i> -xileno de América del Norte y Central (2018).....	66
Tabla 4.20. Mayores exportadores e importadores de <i>p</i> -xileno de América del Norte y Central (2018).....	66
Tabla 4.21. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de América del Norte y Central (2018).	67
Tabla 4.22. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en América del Sur representan respecto al total mundial.....	68
Tabla 4.23. Mayores exportadores e importadores de benceno de América del Sur (2018).....	69
Tabla 4.24. Mayores exportadores e importadores de tolueno de América del Sur (2018).....	70
Tabla 4.25. Mayores exportadores e importadores de <i>o</i> -xileno de América del Sur (2018).....	71
Tabla 4.26. Mayores importadores de <i>m</i> -xileno de América del Sur (2018).	71
Tabla 4.27. Mayores exportadores e importadores de <i>p</i> -xileno de América del Sur (2018).....	72
Tabla 4.28. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de América del Sur (2018).	72
Tabla 4.29. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en África representan respecto al total mundial.....	73

Tabla 4.30. Mayores exportadores e importadores de benceno de África (2018).....	74
Tabla 4.31. Mayores exportadores e importadores de tolueno de África (2018).	75
Tabla 4.32. Mayores exportadores e importadores de <i>o</i> -xileno de África (2018).....	76
Tabla 4.33. Mayores exportadores e importadores de <i>m</i> -xileno de África (2018).....	77
Tabla 4.34. Mayores exportadores e importadores de <i>p</i> -xileno de África (2018).....	78
Tabla 4.35. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de África (2018).	79
Tabla 4.36. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en Oceanía representan respecto al total mundial.	80
Tabla 4.37. Mayores exportadores e importadores de tolueno de Oceanía (2018).	81
Tabla 4.38. Mayores exportadores e importadores de <i>o</i> -xileno de Oceanía (2018).....	82
Tabla 4.39. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de Oceanía (2018).	82
Tabla 4.40. Precios del benceno, el tolueno y la mezcla de isómeros de xileno (2014). 83	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Precios del benceno, tolueno y crudo de petróleo entre los años 2005 y 2014.	15
Figura 2.2. Diagrama de bloques de la cadena productiva del tolueno.	16
Figura 2.3. Resumen de la cadena productiva del o-xileno.....	17
Figura 2.4. Resumen de la cadena productiva del m-xileno.....	17
Figura 2.5. Resumen de la cadena productiva del p-xileno.....	17
Figura 2.6. Principales reacciones industrialmente importantes en la cadena productiva del metanol.	18
Figura 3.1. Ruta reactiva del metanol para su transformación en aromáticos y otros hidrocarburos.	24
Figura 4.1. Valor de las importaciones/exportaciones de metanol, benceno, tolueno y xilenos a nivel mundial (2018).	32
Figura 4.2. Evolución del valor total de las transacciones de metanol a nivel mundial (1995-2018).	33
Figura 4.3. Evolución del valor total de las transacciones de benceno a nivel mundial (1995-2018).	34
Figura 4.4. Evolución del valor total de las transacciones de tolueno a nivel mundial (1995-2018).	34
Figura 4.5. Evolución del valor total de las transacciones de p-xileno a nivel mundial (1995-2018).	35
Figura 4.6. Evolución del valor total de las transacciones de otros xilenos a nivel mundial (1995-2018).	35
Figura 4.7. Evolución del valor total de las transacciones de petróleo crudo a nivel mundial (1995-2018).	36
Figura 4.8. Países exportadores de benceno a nivel mundial (2018).	37
Figura 4.9. Países importadores de benceno a nivel mundial (2018).	37

Figura 4.10. Países exportadores de tolueno a nivel mundial (2018).....	38
Figura 4.11. Países importadores de tolueno a nivel mundial (2018).	39
Figura 4.12. Países exportadores de o-xileno a nivel mundial (2018).	40
Figura 4.13. Países importadores de o-xileno a nivel mundial (2018).....	40
Figura 4.14. Países exportadores de m-xileno a nivel mundial (2018).	41
Figura 4.15. Países importadores de m-xileno a nivel mundial (2018).....	41
Figura 4.16. Países exportadores de p-xileno a nivel mundial (2018).	42
Figura 4.17. Países importadores de p-xileno a nivel mundial (2018).....	42
Figura 4.18. Países exportadores de mezcla de isómeros de xileno a nivel mundial (2018).....	43
Figura 4.19. Países importadores de mezcla de isómeros de xileno a nivel mundial (2018).....	43
Figura 4.20. Evolución mensual del precio del metanol en mercados (2017-2020).	84

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Diagrama de bloques de la cadena productiva del benceno	92
--	----

RESUMEN

El benceno, el tolueno y los xilenos (BTX) son productos muy importantes para la industria petroquímica mundial, debido a que son las materias primas necesarias para la obtención de distintos productos como plásticos, solventes, explosivos, intermediarios, entre otros de gran importancia en la actualidad. Su volumen de producción está fuertemente ligado a la disponibilidad de petróleo, dado que la mayor parte de estos se obtiene como subproducto en las unidades de craqueo catalítico y reformado, lo que los convierte en productos dependientes de la oferta de petróleo a nivel mundial. El metanol se presenta como una materia prima alternativa para la obtención de BTX, debido a los estudios realizados respecto a la reacción de metanol a aromáticos (MTA), para la cual se utilizan diferentes tipos de catalizadores basados en zeolitas ZSM-5, con los cuales se busca incrementar la selectividad hacia los aromáticos, y especialmente hacia los productos de interés como benceno, tolueno y xilenos.

A pesar de que el conocimiento de las rutas reactivas es aún limitado, se han realizado estudios y potenciales diseños de procesos en los que se utiliza la reacción MTA. Existen estudios cinéticos que proponen modelos resumidos para las rutas reactivas de la transformación de metanol a aromáticos, los cuales podrán ser más precisos cuando se tenga un conocimiento más profundo sobre estas.

Los mercados del benceno, del tolueno y de los xilenos, analizados mediante el valor de las transacciones internacionales de estos productos, resaltan su importancia para la industria mundial y reflejan la elevada demanda de estos, así como una gran producción. La comercialización de estos productos se da mayormente en países de Asia y Europa, que son el mayor mercado para estos, y se da principalmente entre países de la misma zona geográfica; no obstante, aunque de menor volumen de comercialización, existen mercados interesantes en otros continentes, que requieren de los productos y se verían beneficiados de poder conseguirlos de países más cercanos.

PALABRAS CLAVES:

Metanol a aromáticos; BTX; catalizadores; zeolita ZSM-5; comercio internacional

ABSTRACT

OBTAINING BENZENE, TOLUENE AND XYLENES FROM METHANOL: TECHNOLOGIES AND PRELIMINARY ANALYSIS OF THE MARKET SITUATION

Benzene, toluene and xylenes (BTX) are important products for the world petrochemical industry because of their usage as raw materials to produce many commodities, such as plastics, solvents, explosives, intermediary compounds, etc. Their production capacity is strongly dependent on crude petroleum availability, since a great percentage of them is obtained as a byproduct in catalytic cracking and reforming units. Against this, methanol shows up as an alternative raw material for BTX production. Research on the methanol to aromatics (MTA) reaction focuses on using catalysts based on ZSM-5 zeolites, with which a high selectivity to aromatics (and specifically BTX) is achieved. Despite the knowledge about reaction pathways is limited, research has been done on designing processes to obtain BTX using MTA. There are studies that propose simplified kinetic models, which would become more precise when the understanding of the reaction pathways is deeper and fully clear.

The markets of benzene, toluene and xylenes, which were analyzed considering the international transactions value for these products, confirm their importance in the world industry and show a high demand and a high production. The trade of this products happens mainly between countries with geographic nearness, with Asia and Europe dominating most markets. Although this, there are interesting markets in other continents, which would have a great benefit by being able to acquire BTX from nearer countries.

KEYWORDS:

Methanol to aromatics; BTX; catalysts; ZSM-5 zeolite, international trade

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el benceno, el tolueno y los xilenos (BTX) son productos requeridos por diversas industrias como materias primas iniciales para procesos de producción de compuestos químicos, ya sean estos productos finales en sí o intermediarios de otros. El benceno, además de utilizarse como solvente, es materia prima para la producción de una amplia variedad de productos como polímeros, insecticidas, colorantes, entre otros [1]. El tolueno es esencial en la industria de producción de explosivos como el trinitrotolueno y otros compuestos de características similares [2]. En el caso de los xilenos, cada uno de sus isómeros, *o*-xileno, *m*-xileno y *p*-xileno, tiene un mercado propio y usos diferentes, siendo uno de los más importantes el *p*-xileno [3], que con procesamiento posterior se puede transformar en tereftalato de polietileno, uno de los plásticos más utilizados a nivel mundial.

A lo largo de la historia, la producción de BTX se ha realizado a partir de diferentes materias primas, empezando por el carbón, y evolucionando hasta llegar a la actualidad en que la gran mayoría de estos proviene del petróleo [4] como subproductos en las unidades de craqueo catalítico y reformado, debido a la necesidad de producirlos en mayor cantidad por una demanda que se incrementó por su uso como materias primas para la obtención de varios productos industriales. Pese a que el petróleo es una importante fuente de obtención, esto genera una dependencia y tendencia inestable en sus precios y su accesibilidad [1], sobre todo ante situaciones de crisis en las que los precios fluctúan.

Ante este problema, surgen alternativas para la obtención de benceno, tolueno y xilenos que no dependan de la disponibilidad del petróleo en el mundo. Una de ellas es el uso de metanol como materia prima, lo cual permitiría producir estos compuestos y garantizar una accesibilidad menos variable, asegurando una mayor estabilidad de su oferta y de su precio. Pese a que no existen procesos industriales ya implementados cuyo principal objetivo sea la obtención de estos compuestos a partir de metanol, la reacción de conversión de metanol a aromáticos (MTA) se encuentra siendo estudiada a escala laboratorio, ensayándose diferentes catalizadores y diferentes tipos de reactores heterogéneos con la finalidad de incrementar el rendimiento y la selectividad hacia los

aromáticos. Estas tecnologías en desarrollo pueden ser la base de nuevos procesos químicos que permitan una producción continua de BTX, y pueden integrarse a otros en los que se obtiene metanol a partir de diversas fuentes, aspecto muy importante de cara al futuro debido al crecimiento del mercado de BTX.

El objetivo de este trabajo de investigación es analizar y describir el estado del arte de las tecnologías existentes y potenciales para procesos de producción BTX a partir de metanol, así como identificar los catalizadores que pueden ser utilizados para favorecer una conversión selectiva de metanol hacia los aromáticos y compararlos en base a sus parámetros y a las consideraciones que deben ser tomadas en cuenta para su uso en procesos industriales. Por otro lado, realizar un análisis preliminar de la situación de mercado global en la actualidad permite conocer la creciente importancia de estos compuestos, y con ella remarcar la importancia de encontrar alternativas viables para su producción. En el Capítulo I se muestran los objetivos de este trabajo de investigación, en el Capítulo II se describe el marco teórico sobre los productos involucrados, en el Capítulo III se realiza una revisión de las tecnologías y avances para la obtención de BTX a partir de metanol, y en el Capítulo IV se muestra el análisis preliminar de la situación del mercado global de cada producto.

CAPÍTULO I

OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

- Dar a conocer las tecnologías de producción de benceno, tolueno y xilenos a partir de metanol y un panorama preliminar de la situación del mercado global actual.

1.2. Objetivos específicos

- Identificar y describir tecnologías de procesos existentes y potenciales para la obtención de benceno, tolueno y xilenos a partir de metanol.
- Identificar y comparar catalizadores para los procesos de obtención de benceno, tolueno y xilenos a partir de metanol.
- Realizar un análisis preliminar de la situación del mercado actual para el benceno, el tolueno, los xilenos y el metanol.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Benceno, producción y aplicaciones

El benceno es un hidrocarburo aromático que se logró aislar por primera vez en el año 1825. El compuesto es un líquido incoloro a temperatura ambiente y es inflamable. Aunque es térmicamente estable, su reactividad lo convierte en una de las materias primas base para la obtención de varios hidrocarburos. Es un excelente solvente orgánico, aunque su uso ha ido disminuyendo con el paso del tiempo debido a su toxicidad. Además, es un componente importante en las gasolinas [1].

Inicialmente, su producción se daba a partir de la pirólisis del carbón, de la cual se separaba de su mezcla con tolueno y xilenos. Esta mezcla de compuestos aromáticos era un subproducto en la obtención de coque para metalurgia, y fue la principal fuente de benceno hasta la Segunda Guerra Mundial. Pasada esta, se descubrieron e implementaron nuevos procesos que permitían obtener compuestos aromáticos a partir del petróleo, esta vez como subproductos en el craqueo catalítico desarrollado con el fin de obtener combustibles de mayor rendimiento [1]. Actualmente, aproximadamente el 70% del benceno producido en el mundo proviene del petróleo [4].

La cadena productiva cuyo punto de inicio es el benceno es amplia y abarca una gran variedad de industrias que lo requieren como insumo para obtener diversos productos. En el Anexo 1 se pueden observar ejemplos de estos.

Dado que el benceno, tolueno y xileno se producen principalmente a partir del petróleo, sus precios y disponibilidades se relacionan directamente. En el siguiente gráfico se observa la variación de precios de benceno y del petróleo en un lapso de 10 años:

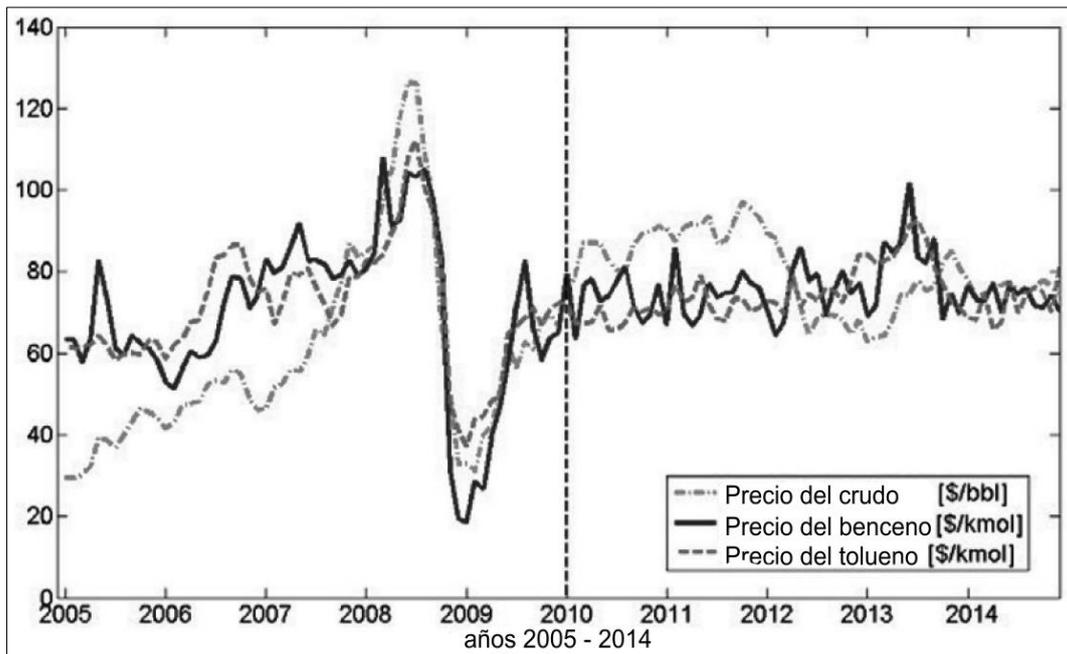


Figura 2.1. Precios del benceno, tolueno y crudo de petróleo entre los años 2005 y 2014.

Fuente: Adaptado de D. Manca, A. Fini & M. Oliosi. Dynamic Conceptual Design under Market Uncertainty and Price Volatility [5].

2.2. Tolueno, producción y aplicaciones

El tolueno, también llamado metilbenceno, es un hidrocarburo aromático que consiste en un anillo bencénico con un radical metilo en uno de sus carbonos. Al igual que el benceno, inicialmente se obtenía a partir de carbón en las plantas de coque, hasta que su importancia y demanda se incrementaron considerablemente en la Primera Guerra Mundial, dada la necesidad de su uso como materia prima en la producción de trinitrotolueno (TNT) para explosivos; y en la Segunda Guerra Mundial debido al aumento de la demanda de combustibles de alto octanaje para aeronaves [2]. Esto llevó a que su producción actual se lleve a cabo a partir del reformado catalítico del petróleo, ya

que este proceso permite producir las cantidades de tolueno suficientes para satisfacer la alta demanda [2].

El tolueno posee una cadena productiva importante, siendo el punto de partida para la producción de solventes, explosivos, compuestos intermedios, y otros productos [1]. También se pueden producir benceno y xilenos a partir del tolueno. En la Figura 2.2 se puede observar un resumen de la cadena productiva del tolueno:

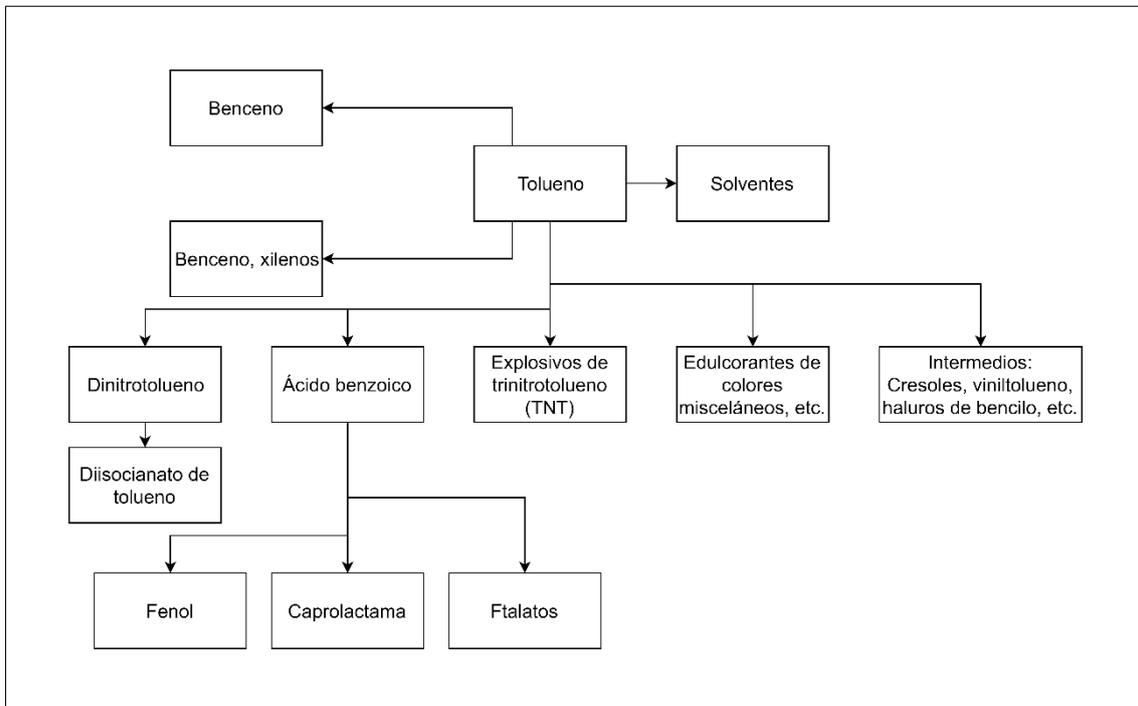


Figura 2.2. Diagrama de bloques de la cadena productiva del tolueno.

Fuente: Adaptado de J. Fabri, U. Graeser & T. Simo. Toluene [2].

De la Figura 2.2 se puede inferir que el tolueno posee una dependencia del petróleo de manera similar al caso del benceno, dado que ambos se producen a partir de esta misma fuente.

2.3. Xilenos, producción y aplicaciones

El xileno es el nombre con el que se conoce al dimetilbenceno [6]. Este compuesto puede presentarse en tres isómeros: *o*-xileno, *m*-xileno y *p*-xileno. El 83% de xilenos se producen a partir del reformado catalítico del petróleo, siendo dependientes de este al igual que el tolueno y el benceno. Los isómeros son producidos como una mezcla de

xilenos, de los cuales el que se utiliza en mayor proporción es el *p*-xileno, seguido del *o*-xileno y finalmente el *m*-xileno [6].

Cada isómero de xileno tiene un mercado propio y una cadena productiva diferente. También son comercializados como mezcla de isómeros de xileno, según sea su uso. En las Figuras 2.3, 2.4 y 2.5 se observan los principales compuestos producidos a partir del *o*-xileno, *m*-xileno y *p*-xileno respectivamente:

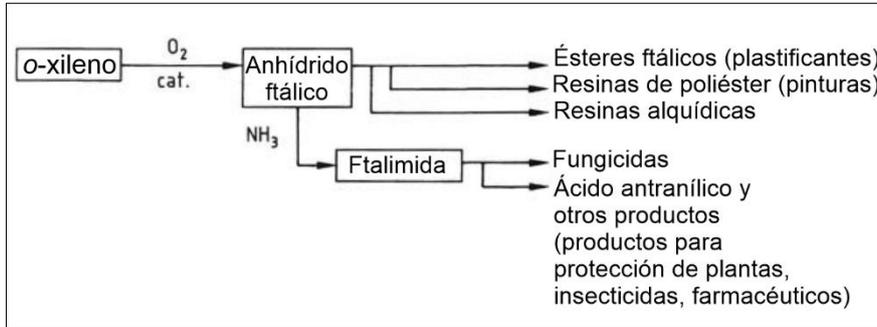


Figura 2.3. Resumen de la cadena productiva del *o*-xileno.
Fuente: Adaptado de J. Fabri, U. Graeser & T. Simo. Xylenes [6].

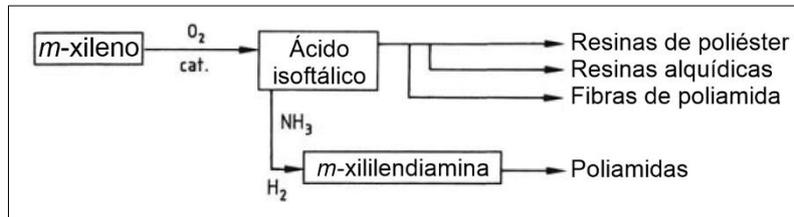


Figura 2.4. Resumen de la cadena productiva del *m*-xileno.
Fuente: Adaptado de J. Fabri, U. Graeser & T. Simo. Xylenes [6].

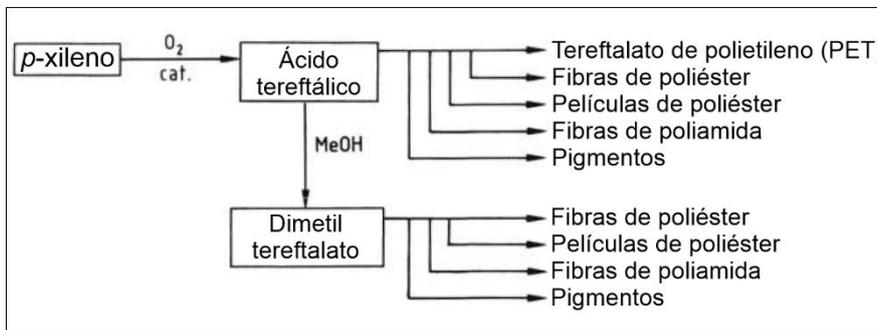


Figura 2.5. Resumen de la cadena productiva del *p*-xileno.
Fuente: Adaptado de J. Fabri, U. Graeser & T. Simo. Xylenes [6].

En la Figura 2.5 se observa que el *p*-xileno es necesario para producir ácido tereftálico [3], a partir del cual se obtiene el tereftalato de polietileno.

Al igual que el benceno y el tolueno, los xilenos también se producen mayormente a partir del petróleo [4], razón por la cual también poseen una dependencia directa de este en cuanto a su precio y disponibilidad. Recientemente, varias empresas grandes a nivel

mundial se encuentran desarrollando investigaciones que permitan la obtención de *p*-xileno a partir de otras materias primas, entre las cuales se encuentra la biomasa, con el fin de desligar la producción de tereftalato de polietileno (PET), producto final en parte de la cadena productiva del *p*-xileno, de recursos fósiles como el petróleo [7].

2.4. Metanol y sus aplicaciones

El metanol, también llamado alcohol metílico, es un hidrocarburo que representa una de las materias primas más importantes dentro de la industria química [8]. Aproximadamente el 85% del metanol que se produce a nivel mundial es utilizado como reactivo o solvente en la síntesis de otros compuestos químicos, mientras que el resto se utiliza en el sector energético y de combustibles [8].

Puede obtenerse a través de su síntesis o de su separación a partir de petróleo crudo. Como materia prima, es un compuesto de partida importante para muchas reacciones químicas de relevancia industrial. En la siguiente imagen se observan algunas de las reacciones más importantes a nivel industrial:

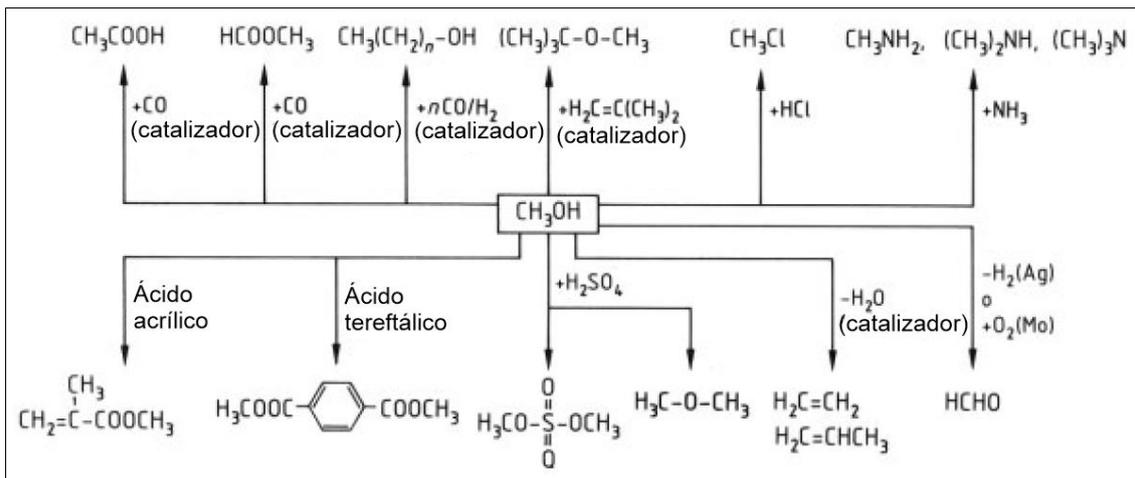


Figura 2.6. Principales reacciones industrialmente importantes en la cadena productiva del metanol.
Fuente: E. Fiedler, G. Grossmann, D. Kersebohm, G. Weiss, & C. Witte. Methanol [8].

Las principales y más comunes rutas reactivas que se siguen partiendo del metanol son para sintetizar compuestos como formaldehído, ácido acético y metil *tert*-butil éter [8]. También existen otros productos que pueden sintetizarse, como la reacción de conversión de metanol a gasolina, que ya posee procesos implementados a escala industrial, y las reacciones de metanol a olefinas y de metanol a aromáticos, de las que se están realizando estudios que permitirán tener un mayor conocimiento sobre estas,

principalmente de la reacción MTA, que se encuentra menos desarrollada, y la factibilidad de su implementación a gran escala [8].

2.5. Reacción química de metanol a aromáticos

En el año 1977 se publicó un estudio [9] realizado en la división de investigación de la compañía Mobil, en el cual se describe por primera vez la posibilidad de la conversión del metanol y otros compuestos orgánicos que contienen átomos de oxígeno en otros hidrocarburos utilizando catalizadores de zeolita. Entre los productos que se pueden obtener se encuentran los hidrocarburos aromáticos, y esta reacción química es la que se conoce como MTA (*Methanol to aromatics*).

La reacción química MTA, que permite la transformación del metanol en benceno, tolueno, xileno y otros compuestos aromáticos, ocurre por medio de rutas reactivas catalíticas y de condiciones de operación (presión y temperatura) para que su selectividad sea mayor hacia los hidrocarburos aromáticos que para los alifáticos [9]. Por lo tanto, el principal objeto de estudio que impacta directamente en el resultado final de la reacción química es el catalizador, y sus parámetros, características y condiciones de operación son determinantes en la conversión, rendimiento y selectividad. Conocer esta información permite elegir el catalizador y las condiciones óptimas para el proceso. Asimismo, la cinética de esta reacción, junto a la de las reacciones paralelas que producen otros hidrocarburos, es un factor muy importante para considerar en el diseño del proceso, dado que este análisis permite tomar en cuenta parámetros adecuados para el diseño del reactor, etapa clave en la obtención de benceno, tolueno y xileno.

La reacción MTA podría ser utilizada en procesos a escala industrial, funcionando como una nueva fuente de obtención de hidrocarburos aromáticos que sea independiente del petróleo. La importancia del benceno, tolueno, xileno y de los otros compuestos aromáticos motiva el incremento de investigaciones relacionadas a su obtención, hecho que, sumado a la todavía escasa disponibilidad de datos cinéticos [10] de la conversión de metanol a otros hidrocarburos, hace que actualmente sea un tema de interés a nivel mundial. Algunos estudios muestran principalmente resultados experimentales obtenidos con el fin de determinar, a escala laboratorio, características y parámetros para que la reacción MTA sea óptima. Pese a existir gran cantidad de información sobre la

conversión, selectividad y rendimiento, no sucede lo mismo para la cinética de las reacciones químicas de este proceso, la cual es escasa y se ha empezado a estudiar recientemente.

2.6. Zeolitas ZSM-5

Las zeolitas ZSM-5, utilizadas como base para catalizadores, y su método de preparación fueron patentados por la Mobil Oil Corporation en el año 1972 [11]. Su síntesis se puede realizar en base a un óxido de catión metálico, un óxido de aluminio o galio, y un óxido de silicio o germanio [11]. Son aluminosilicatos cristalinos que tienen propiedades catalíticas favorables para las reacciones de conversión de hidrocarburos [11]. A las zeolitas ZSM-5 se les puede incluir cationes metálicos por intercambio iónico o por impregnación [12].

CAPÍTULO III

TECNOLOGÍAS DE OBTENCIÓN DE BENCENO, TOLUENO Y XILENOS A PARTIR DE METANOL

3.1. Catalizadores

La existencia de los catalizadores de zeolita ZSM-5 es un gran avance en las tecnologías para la producción de hidrocarburos aromáticos a partir de metanol, puesto que permite que se den las rutas reactivas para llevar a cabo esta conversión, además de mejorar la selectividad hacia los aromáticos. Sin embargo, los diferentes catalizadores utilizados sobre la base de las zeolitas ZSM-5 aún no han sido suficientemente estudiados [13], y la selectividad hacia a los aromáticos y hacia productos de mayor interés como el benceno, el tolueno o los xilenos continúa siendo insuficiente para las expectativas de los investigadores [14]. Esto, sumado al incompleto conocimiento de las rutas reactivas que llevan a la transformación de la materia prima en los productos finales [15], demuestra la necesidad de desarrollar más investigaciones con el fin de encontrar catalizadores

óptimos cuyas características permitan alta selectividad hacia los aromáticos y conversión completa, para así favorecer la viabilidad de la obtención de benceno, tolueno y xilenos a partir de metanol.

En los últimos 10 años, el enfoque de las investigaciones realizadas ha sido principalmente medir y comparar la eficiencia del uso de diferentes modificaciones del catalizador ZSM-5. Un estudio del año 2011 realizado en China [14] evalúa la introducción de lantano en un catalizador ZSM-5 previamente modificado por zinc. Los autores presentan los resultados del estudio comparando la selectividad de cada catalizador hacia los productos aromáticos deseados, llegando a la conclusión de que el catalizador La/Zn/HZSM-5 es el mejor de los que se probaron, con una selectividad de 56.6% para los aromáticos. Otro estudio publicado al año siguiente [16] prueba la selectividad y la durabilidad de catalizadores ZSM-5 dopados con paladio, iridio, rutenio, plata, níquel y cobre, siendo el níquel el mejor de estos con una selectividad de 59.6%. Para el año 2014 se publicó otro artículo [17] en el que se estudia al zinc como metal modificador para nanozeolitas (NZ) HZSM-5, en el cual se determinó que este catalizador era el mejor respecto al Zn/HZSM-5 y a otros que contienen plata, cobre o molibdeno. El rendimiento hacia los aromáticos alcanzó un 67.7%, valor que supera el hallado en los estudios mencionados previamente.

Si bien se puede observar que la tendencia indica que los estudios de la última década están logrando conseguir incrementar gradualmente la selectividad de los aromáticos a partir del metanol, es muy importante resaltar dos estudios realizados en los años 1994 y 1995 por los mismos autores (Ono e Inoue) [12] [18], ya que en este se evalúa al Ag-ZSM-5 como catalizador, primero para la conversión de varios hidrocarburos hacia los aromáticos, y luego comparando su rendimiento partiendo de metanol respecto a otros catalizadores. Es en el primer estudio [12] en el que se determina que la mayor conversión se da en el caso del metanol, al igual que la mejor selectividad para aromáticos; mientras que en el segundo estudio [18] se descubre que, cambiando las condiciones de operación a través de un incremento de temperatura hasta los 750 K, se puede alcanzar una selectividad de hasta 80.3% para los compuestos aromáticos. Pese a tener una antigüedad de 25 años, esta información es de suma importancia, pues proporciona un alto valor de selectividad para compuestos aromáticos.

Los estudios más recientes también tuvieron el objetivo general de incrementar la selectividad hacia los aromáticos en la reacción MTA, aunque con un enfoque específico en los tratamientos posteriores que se le puede realizar a la zeolita ZSM-5, y buscando una mayor selectividad específicamente hacia el *p*-xileno, debido a su alta demanda en el mercado como producto [13] [19]. En el año 2019 se publicó un estudio [13] en el que se realizan diferentes tipos de tratamientos a las zeolitas ZSM-5, tales como desaluminación, desilicación y pasivación superficial, con el fin de incrementar su selectividad hacia los aromáticos para la obtención de benceno, tolueno y xilenos, consiguiendo alcanzar una selectividad hacia los aromáticos de 78.6%. En el mismo año, otro estudio [20] realizó pruebas con zeolitas ZSM-5 sintetizadas con zinc y aluminio, para luego ser modificadas con magnesio y fósforo, obteniendo una selectividad máxima de 62.2%. Ya en el año 2020, en un nuevo estudio [21] se realizaron pruebas utilizando molibdeno en la zeolita ZSM-5, dando como resultado una selectividad de 86.0% hacia los aromáticos, y de 65.7% hacia el benceno, el tolueno y los xilenos. Este estudio es, hasta el momento, el de mayor relevancia para la obtención de BTX a partir de metanol, puesto que reporta la mayor selectividad alcanzada hacia los aromáticos, con énfasis en que la impregnación de molibdeno tuvo efectos menores en la formación de coque y otras desventajas posibles en el uso de catalizadores, además de utilizar un elemento cuyo costo es mucho menor al de la plata, que había sido utilizada en los estudios iniciales de hace 25 años. Finalmente, otro estudio del presente año [19] mostró los resultados de la modificación de las zeolitas ZSM-5 utilizando fósforo, con los cuales no se consiguió una alta selectividad ni una conversión completa del metanol, pero se obtuvo un incremento en el porcentaje de selectividad hacia el *p*-xileno en comparación con el de los otros aromáticos, permitiendo la obtención de *p*-xileno más puro a través del uso de este catalizador.

En Tabla 3.1 se muestra de forma resumida la información más relevante extraída de cada publicación científica reportada a la fecha.

Referencia	Catalizador	Conversión de metanol	Selectividad hacia los aromáticos
[19]	5% P/HZSM-5	68.4%	15.4%
[19]	HZSM-5	~100.0%	33.3%
[14]	La/Zn/HZSM-5	100.0%	56.6%
[16]	Ni/ZSM-5	~100.0%	59.6%
[20]	[ZnS]ZSM-5	100.0%	62.2%
[17]	Zn/NZ (Nano HZSM-5)	100.0%	67.7%
[13]	HZSM-5-1 M -0.09 M	No se menciona	78.6%
[12] [18]	Ag-ZSM-5	100.0%	80.3%
[21]	2[Mo]HZSM-5	>95.0%	86.0%

Tabla 3.1. Resumen de catalizadores óptimos de cada estudio en función de su selectividad para compuestos aromáticos.

Fuente: Adaptado de [12] [13] [14] [16] [17] [18] [19] [20] [21].

3.2. Estudios cinéticos

Como se mencionó previamente, los estudios cinéticos para esta reacción son muy escasos, debido a su complejidad y a las reacciones en paralelo [10]. Se han encontrado tres estudios que muestran modelos cinéticos de la reacción de transformación de metanol a aromáticos junto a las reacciones en paralelo que forman otros productos. En un estudio [22], publicado en 2010, se explica de manera detallada el mecanismo de las reacciones que ocurren y que culminan con la producción de hidrocarburos aromáticos. En el esquema de la Figura 3.1 se puede visualizar de qué manera se transforma el metanol en otros hidrocarburos.

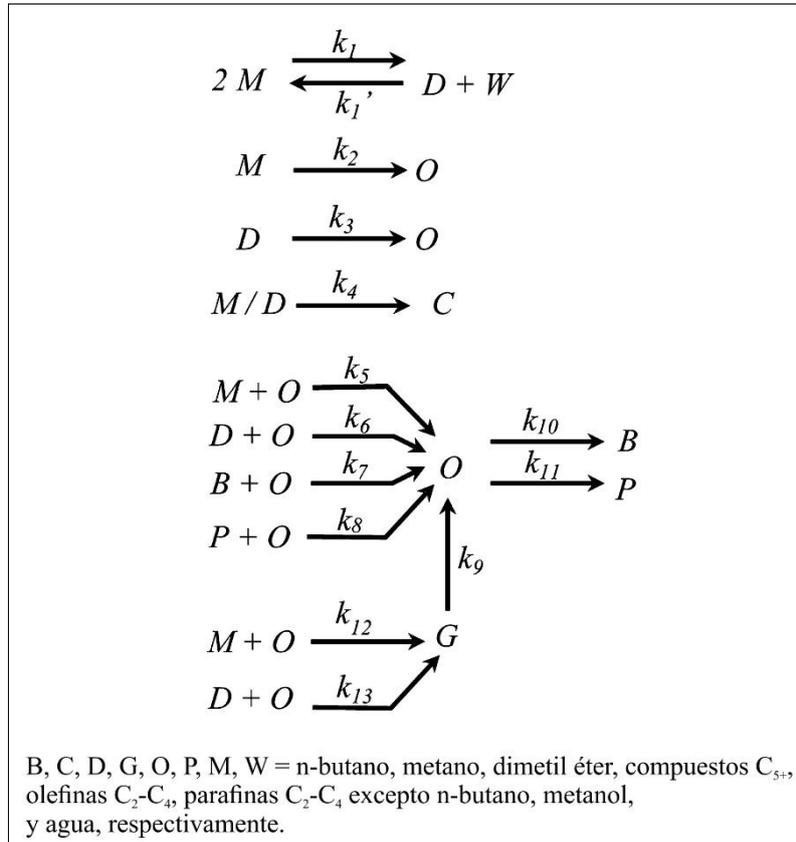


Figura 3.1. Ruta reactiva del metanol para su transformación en aromáticos y otros hidrocarburos. Fuente: Adaptado de A. Aguayo, D. Mier, A. Gayubo, M. Gamero y J. Bilbao. Kinetics of Methanol Transformation into Hydrocarbons on a HZSM-5 Zeolite Catalyst at High Temperature (400-550 °C) [22].

Como se puede observar en la Figura 3.1, los productos que se obtienen a partir de este proceso han sido agrupados. La ruta reactiva propuesta implica la transformación del metanol en olefinas, y la conversión del metanol y olefinas en compuestos aromáticos. Este mecanismo de reacción también es descrito con mayor nivel de detalle en otro artículo [23], en el que se estudia el proceso de conversión desde un punto de vista químico.

Esta información es útil para al ser considerada en el diseño de reactores, que son pueden ser utilizados en potenciales procesos de obtención de benceno, tolueno y xileno a partir de metanol. Posteriormente, en 2018 fue publicado un nuevo estudio cinético de la conversión de metanol a aromáticos [10]; sin embargo, en este caso los productos fueron agrupados únicamente en cuatro categorías grandes: los compuestos que contienen solo un átomo de carbono en cada molécula, los hidrocarburos alifáticos, los aromáticos pesados y los aromáticos ligeros.

Aunque el hecho de que la existencia de una menor cantidad de grupos de compuestos podría dificultar la precisión en la predicción de los productos formados, en esta publicación hay un grupo que contiene únicamente a los aromáticos ligeros, a diferencia de la anterior que incluía a los mismos dentro de un mismo grupo junto a los pesados y también a los alifáticos de cinco o más átomos de carbono por molécula, y esto es una ventaja debido a que los productos que se buscan obtener son el benceno, tolueno y xileno, los cuales son aromáticos ligeros. Además, el enfoque de este último estudio está orientado al desempeño del catalizador con relación a su actividad, mostrando que su efecto en la conversión y selectividad es mínimo, tal como se muestra en la Tabla 3.2.

	a = 1	a = 0.6	a = 0.3
Rendimiento del catalizador (gMetanol·gCatalizador ⁻¹)	18	57	141
Conversión de metanol	99.48%	99.36%	99.12%
Hidrocarburos alifáticos (porcentaje en peso)	52.17	52.09	51.97
Aromáticos livianos (porcentaje en peso)	27.28	27.24	27.17
Aromáticos pesados (porcentaje en peso)	14.94	14.93	14.89

(a: actividad del catalizador)

Tabla 3.2. Efecto de la actividad del catalizador ZSM-5 modificado en la conversión y a selectividad de los aromáticos.

Fuente: Adaptado de N. Li, C. Meng and D. Liu. Deactivation kinetics with activity coefficient of the methanol to aromatics process over modified ZSM-5 [10].

El rendimiento del catalizador, en términos de la relación entre la masa de metanol y la masa del catalizador, está directamente relacionado con la actividad, es decir, depende de esta al igual que los otros parámetros [10]. Sin embargo, de los datos observados se puede concluir que el efecto de la actividad sobre el rendimiento es mínimo.

La ausencia de más estudios cinéticos para el proceso de conversión de metanol a aromáticos representa un reto debido a que necesariamente se tiene que recurrir a los datos experimentales de la distribución de los productos para predecir el comportamiento de un reactor MTA, dado que estos son más detallados y permiten obtener resultados más confiables y con mayor precisión tomando en cuenta cada componente formado y no solamente de grupos. Además, estudios recientes [15] [24] indican que las rutas reactivas que se llevan a cabo para la transformación del metanol en hidrocarburos aromáticos no

han sido suficientemente estudiadas y no están claras aún, ya que existe la posibilidad de la formación de intermediarios como el formaldehído, el cual no se toma en cuenta en las rutas reactivas convencionales propuestas. Esto implica que la exactitud de los resultados obtenidos con las predicciones de modelos cinéticos ajustados a las rutas reactivas convencionales no sea suficiente como para considerarlos modelos totalmente confiables en el diseño de reactores y procesos para la reacción MTA, demostrando nuevamente la necesidad de realizar más estudios alrededor de los catalizadores y de la reacción química, hasta alcanzar un pleno entendimiento del proceso reactivo y hacer posible la construcción de modelos cinéticos más confiables.

3.3. Antecedentes a escala industrial y de diseño de procesos

Conocer qué estudios previos de diseño de procesos a escala industrial se han realizado brinda datos muy importantes que dan una idea sobre la viabilidad técnica del proceso de obtención de benceno, tolueno y xileno a partir de metanol con las tecnologías actuales. La existencia de algún proceso que incluya la conversión de metanol a aromáticos o de algún estudio de prefactibilidad económica sirve como soporte a la hipótesis de que podría ser también económicamente rentable utilizar metanol en reemplazo del petróleo como materia prima.

Existen algunas publicaciones en las que se diseñan procesos de obtención de aromáticos a partir de compuestos diferentes al metanol, como gas natural o gas de síntesis, que son primero transformados en metanol para luego convertirse en aromáticos. Asimismo, existen propuestas de procesos con materias primas alternativas para la obtención de estos productos. El objetivo es desligar del petróleo a la producción de aromáticos en el mundo.

3.3.2. Procesos de producción de benceno, tolueno y xilenos a partir de metanol

Aunque a escala de laboratorio existen estudios que determinan las condiciones óptimas para la obtención de benceno, tolueno, xileno y otros aromáticos a partir de metanol, a escala industrial, al igual que en el caso de los estudios cinéticos, los estudios existentes son muy recientes. Se encontró una publicación en la cual se incluye el proceso

de transformación de metanol en benceno, tolueno y xileno [4], en la que la materia prima es el gas natural. De manera resumida, el proceso descrito en este estudio [4] proponía obtener el metanol a partir del gas natural, y luego convertirlo en benceno, tolueno y xileno utilizando un catalizador basado en la zeolita ZSM-5. Esta referencia es la más importante hasta el momento, dado que en ella se realiza un estudio económico que concluye que, en Estados Unidos, producir benceno, tolueno y xileno mediante este camino puede reducir el costo de inversión hasta en un 65% en comparación a los estimados para plantas de producción basadas en carbón [4]. Otros factores importantes que pueden extraerse de este artículo son los datos sobre operaciones unitarias y condiciones de operación en cada bloque del proceso, así como en el reactor. Es importante remarcar que en el proceso diseñado en este artículo no se utilizaron datos cinéticos en el modelamiento del reactor.

Adicionalmente, se encontraron algunas patentes que, o bien incluyen la transformación de metanol en aromáticos como subproceso, o bien hablan sobre la producción de benceno a partir de otro compuesto. En una de ellas [25] se describe un proceso de producción de polímeros y cumeno a partir de metano, el cual reacciona inicialmente con agua para producir metanol, y luego el proceso continúa pasando primero por los aromáticos como intermediarios. En otra patente [26] se producen metanol y benceno, pero ambos a partir de metano y mediante una ruta reactiva diferente. Lo principal que puede inferirse de estos documentos es que en la industria ya existen procesos que incluyen al menos como un subproceso a la conversión de metanol a aromáticos, hecho que se confirma al verificar que en uno de los estudios cinéticos mencionados en la primera sección [10] obtienen los datos de condiciones de operación de una planta industrial.

Junto a la información sobre catalizadores y a los recientes datos cinéticos, los estudios de diseño de procesos conforman el grupo de elementos clave y son necesarios para futuros diseños de reactores y procesos viables y con resultados positivos. El estado del arte de la producción de BTX a partir de metanol muestra que este campo de estudio aún se encuentra en camino a elucidar la información técnica necesaria para descubrir nuevas posibilidades que permitan hacer realidad la implementación de un proceso, cada vez menos ideal y más cercano a la realidad, a través de la evaluación de su viabilidad, y esto representa una oportunidad para el desarrollo de estudios relacionados al tema.

3.4. Procesos alternativos de producción de benceno, tolueno y xilenos

El 70% del benceno, tolueno y xileno que se producen actualmente proviene del petróleo [1], dado que se obtienen como subproductos en las unidades de craqueo catalítico y reformado. Las investigaciones orientadas a procesos de producción de benceno, tolueno, xileno y otros aromáticos están enfocadas principalmente en la optimización de los procesos ya existentes a partir de petróleo, aunque también se han realizado algunos estudios que proponen su obtención a partir de biomasa o de otros hidrocarburos.

Por ejemplo, un estudio [27] muestra el método de obtención de benceno, tolueno y xileno a partir de bagazo de caña mediante la pirólisis rápida, en el cual se propone el uso de este tipo de biomasa frente a otras posibilidades; sin embargo, la selectividad hacia el benceno, el tolueno y los xilenos solo alcanza el 21.2%, valor que es inferior al que en el mismo estudio reportan que se alcanza con otros materiales lignocelulósicos como la madera (43.8% de selectividad), cuya selectividad hacia los aromáticos sigue siendo baja en comparación con la que se puede obtener partiendo desde el metanol. Cabe resaltar que la base para la catálisis es, al igual que en el proceso a partir de metanol, la zeolita ZSM-5. En otro estudio [28] se utilizó al propano como materia prima para la producción de los mismos compuestos, para lo cual se compararon varios catalizadores, obteniendo una selectividad hacia los aromáticos de 56% utilizando el Ga/ZSM-5, valor importante pero aún inferior a la selectividad que se puede obtener a partir de metanol. Por otra parte, una mayor selectividad es obtenida en el proceso descrito en una patente para la producción de aromáticos a partir de metano (particularmente gas natural) [29], la cual se encuentra alrededor del 90%, y es obtenida utilizando catalizadores de zeolita ZSM-5 con molibdeno, compuesto con el que también se logró alcanzar la mayor selectividad en la obtención de aromáticos a partir de metanol. Es importante resaltar que la patente describe un subproceso de regeneración del catalizador desactivado, el cual se da a altas temperaturas (700°C a 1200°C), y que el proceso global de obtención de aromáticos se realiza a presiones superiores a la atmosférica.

La pirólisis rápida de polvo de madera fue estudiada en 2011 [30] utilizando también catalizadores basados en zeolitas ZSM-5, pero la máxima selectividad alcanzada hacia los aromáticos fue de 14.0%. Otro estudio de 2017 [31] muestra que la pirólisis

catalítica de bioaceites puede alcanzar una selectividad hacia los aromáticos de 90.28% utilizando el catalizador Zn-ZSM-5, algo muy importante para ser considerado, ya que supera la mayor selectividad alcanzada en el caso de la obtención a partir de metanol. Posteriormente, la pirólisis catalítica de materia celulósica se continuó estudiando [32], realizando pruebas con diferentes catalizadores para incrementar la selectividad, tal como en el caso del metanol. Otra alternativa para la producción de aromáticos es la co-aromatización de metanol y furano, cuyos estudios [33] [34] mostraron como resultado una máxima selectividad hacia los aromáticos de 45.1%. Algo resaltante entre estos estudios es la importancia del metanol en la posibilidad de desarrollar bioprocesos para la obtención de aromáticos, dado que el incluir el metanol en la alimentación junto al furano favorece la selectividad hacia los aromáticos en el proceso global [34].

Un diseño de proceso reciente [35] muestra una alternativa para la obtención de aromáticos, ya que no solamente incluye al metanol en la alimentación, sino también al pentano, algo que influye en la viabilidad económica, dado que el pentano puede ser recirculado hacia la alimentación para maximizar su aprovechamiento, razón por la cual se reporta un valor presente neto alto tras el análisis tecno-económico realizado.

Finalmente, la simulación de un proceso de producción de aromáticos a partir de gas de síntesis [36] lo muestra como una alternativa para su obtención, en la cual cabe resaltar que el proceso global se divide en dos subprocesos: la obtención de metanol a partir de gas de síntesis, y la obtención de aromáticos a partir de metanol. Esto confirma la importancia de las tecnologías para la obtención de benceno, tolueno y xilenos a partir de metanol, que son necesarias para ser utilizadas incluso en procesos en los que no se usa el metanol como materia prima inicial.

En la Tabla 3.3 se muestra un resumen de la selectividad hacia los aromáticos alcanzada utilizando cada materia prima alternativa.

Referencia	Materia prima	Selectividad hacia los aromáticos
[30]	Polvo de madera	14.0%
[27]	Bagazo de caña	21.2%
[27]	Madera	43.8%
[33]	Furano y metanol	45.1%
[28]	Propano	56.0%
[29]	Metano (gas natural)	90.0%
[31]	Bioaceites	90.3%

Tabla 3.3. Materias primas alternativas para la obtención de aromáticos y sus selectividades.
Fuente: Adaptado de [26] [27] [28] [29] [30] [32].

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA SITUACIÓN DEL MERCADO

La importancia de un producto y de las materias primas necesarias para su obtención adquiere una mayor relevancia si la situación del mercado actual es favorable, y conocerla es sumamente importante e indispensable, puesto que permite tener una amplia visión de lo que sucede a diferentes escalas, a nivel global, regional y local, y esto a su vez influye en la viabilidad económica de la producción, así como en un menor o mayor interés por invertir en el desarrollo de un proceso. El benceno, tolueno y xileno tienen un mercado propio y diferente cada uno, los cuales deben ser analizados a detalle para obtener conclusiones adecuadas.

El análisis preliminar de la situación actual se realizó con base en el valor de las importaciones y exportaciones de cada uno de los compuestos químicos mencionados, tomando en cuenta la evolución del mercado a lo largo del tiempo, incluyendo estimaciones a futuro, dado que únicamente se dispone de estos datos y no de estudios de mercado con detalles específicos sobre la oferta y demanda. Asimismo, es importante identificar a los principales importadores y exportadores de cada producto a nivel mundial

y por regiones, complementando esta información con los factores que influyen en el comercio de estos, para así comprender cómo funciona el mercado. Pese a que existen limitaciones debido a que no toma en cuenta la producción ni el consumo neto de los productos en cada país, el análisis es útil para tener una idea referencial preliminar respecto a la situación actual de cada mercado. Los datos analizados fueron obtenidos de *The Observatory of Economic Complexity* (OEC) [37], herramienta analítica desarrollada con el fin de proporcionar datos que permitan el entendimiento de la dinámica económica internacional a través del acceso a datos desagregados de comercio internacional de diversos productos [38].

4.1. Valor de las importaciones y exportaciones

La comercialización de los diferentes productos químicos a nivel mundial puede medirse a través del valor de las transacciones internacionales realizadas en las importaciones/exportaciones de los productos, cuyo valor total es un buen indicador que permite conocer el estado actual del mercado del producto analizado, así como inferir cualitativamente su demanda y determinar su relevancia.

El benceno, el tolueno y los xilenos tienen mercados con valores diferentes, lo que indica que algunos de estos productos tienen una mayor demanda y relevancia que los restantes. En el caso particular de los xilenos, cada uno de los isómeros (*o*-xileno, *m*-xileno y *p*-xileno) tiene un mercado con características peculiares, debido a sus diferentes usos, y también se comercializan como mezcla de isómeros de xileno, cuyas transacciones tienen igualmente un valor propio. En la Figura 4.1 se muestra el valor de los mercados de la materia prima (metanol) y los productos mencionados.

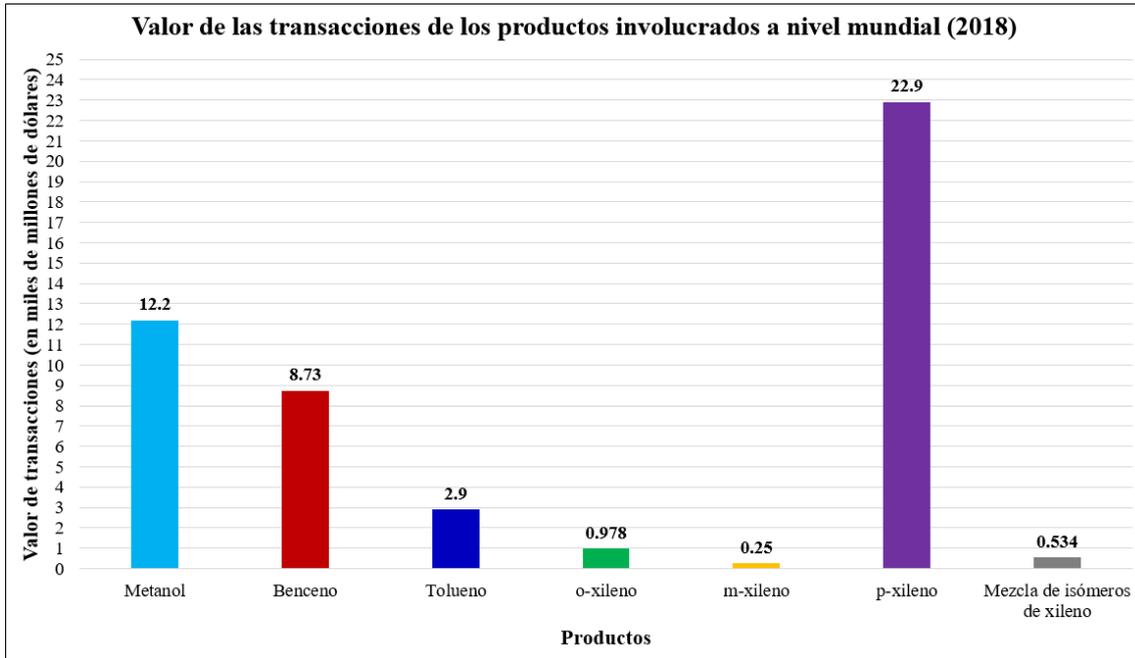


Figura 4.1. Valor de las importaciones/exportaciones de metanol, benceno, tolueno y xilenos a nivel mundial (2018).

Fuente: Adaptado de The Observatory of Economic Complexity [37].

Se observa que el mercado de *p*-xileno es el más importante entre los productos con un valor de aproximadamente 22900 millones de dólares en transacciones de importación/exportación, superando ampliamente al benceno, al tolueno y a los otros xilenos. La importancia del *p*-xileno radica en su cadena productiva, puesto que, como se mencionó previamente, es la materia prima utilizada en la obtención de ácido tereftálico [3], que a su vez se utiliza para la producción de tereftalato de polietileno, el cual tiene una gran importancia en el mercado por ser componente de la mayoría de las botellas de plástico, con propiedades que lo hacen reciclable y reutilizable [39]. Los mercados del *o*-xileno y el *m*-xileno tienen un valor mucho menor, al igual que las transacciones de xilenos como mezcla de isómeros, debido a una menor relevancia en sus respectivas aplicaciones y a la necesidad de realizar un proceso de separación a la mezcla isomérica si se requiere aislar alguno de los isómeros. Aunque el valor de sus transacciones no sea tan elevado como el correspondiente al *p*-xileno, el benceno es otro compuesto muy importante, puesto que, además de su mencionado uso como solvente, la amplia cadena productiva que posee, que se puede observar en el Anexo 1, lo hace relevante para diversas industrias como materia prima, y esto eleva su valor en el mercado respecto a productos como el tolueno, cuyas transacciones también tienen un valor considerable, pero menor debido a la menor cantidad de usos y aplicaciones que posee.

Por otra parte, analizar el valor de las transacciones del metanol es relevante por tratarse de la materia prima de la cual se parte para la obtención de los productos. El valor de su mercado lo sitúa solo por debajo del *p*-xileno entre los compuestos químicos de interés, e indica una gran oferta y demanda de este producto a nivel mundial.

4.2. Evolución de los mercados

Así como es importante conocer la situación actual de los mercados, el análisis se ve fortalecido al analizar la evolución de estos a lo largo del tiempo, ya que esto permite identificar tendencias de las cuales se puede inferir si los productos en cuestión podrían volverse más o menos relevantes de cara al futuro, tomando como indicador el incremento, reducción o estancamiento del valor de la comercialización de cada uno. En las Figuras 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se muestra la evolución de los mercados del metanol, benceno, tolueno y los diferentes isómeros de xileno.

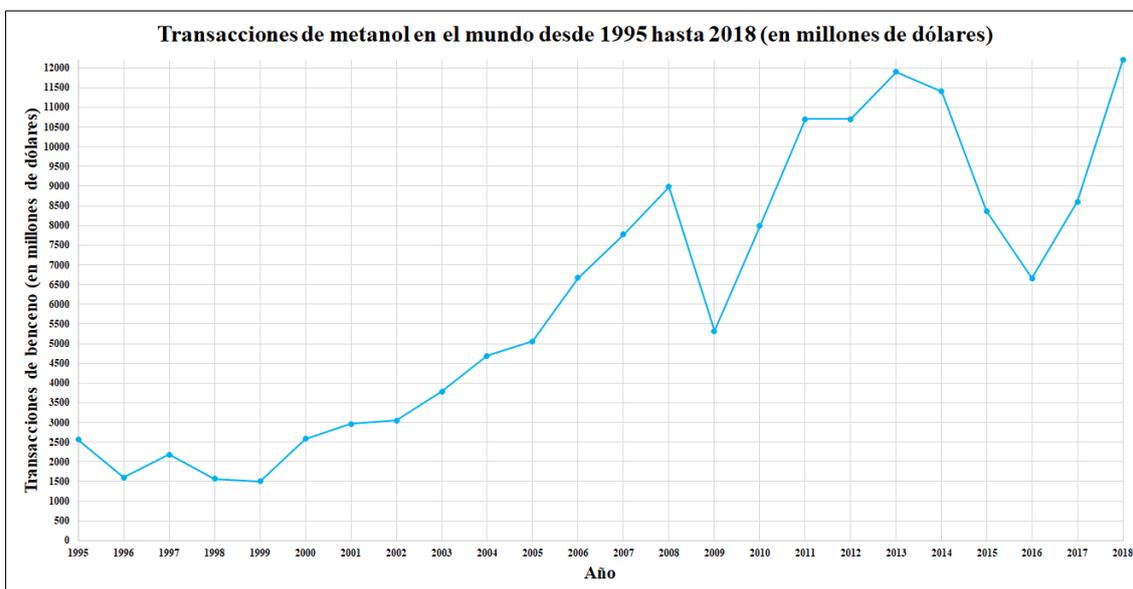


Figura 4.2. Evolución del valor total de las transacciones de metanol a nivel mundial (1995-2018).
Fuente: Adaptado de The Observatory of Economic Complexity [37].

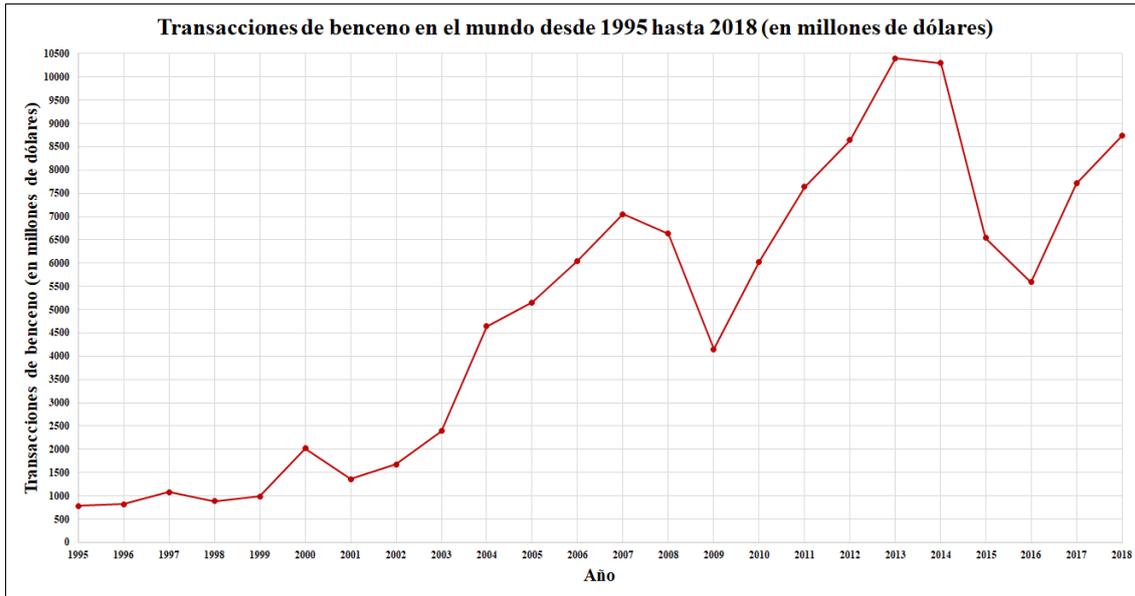


Figura 4.3. Evolución del valor total de las transacciones de benceno a nivel mundial (1995-2018).

Fuente: Adaptado de The Observatory of Economic Complexity [37].

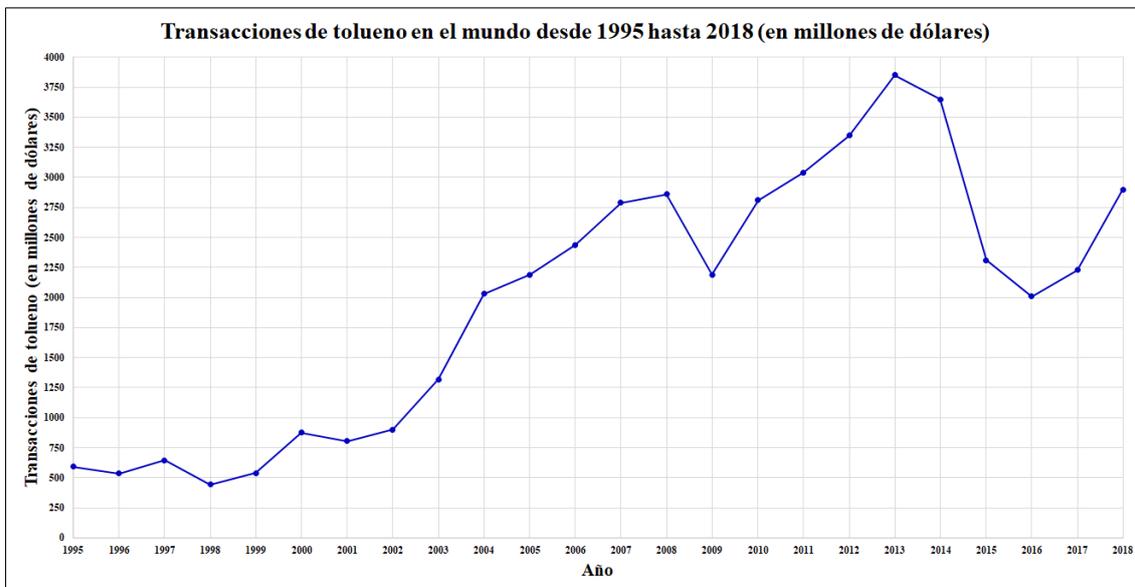


Figura 4.4. Evolución del valor total de las transacciones de tolueno a nivel mundial (1995-2018).

Fuente: Adaptado de The Observatory of Economic Complexity [37].

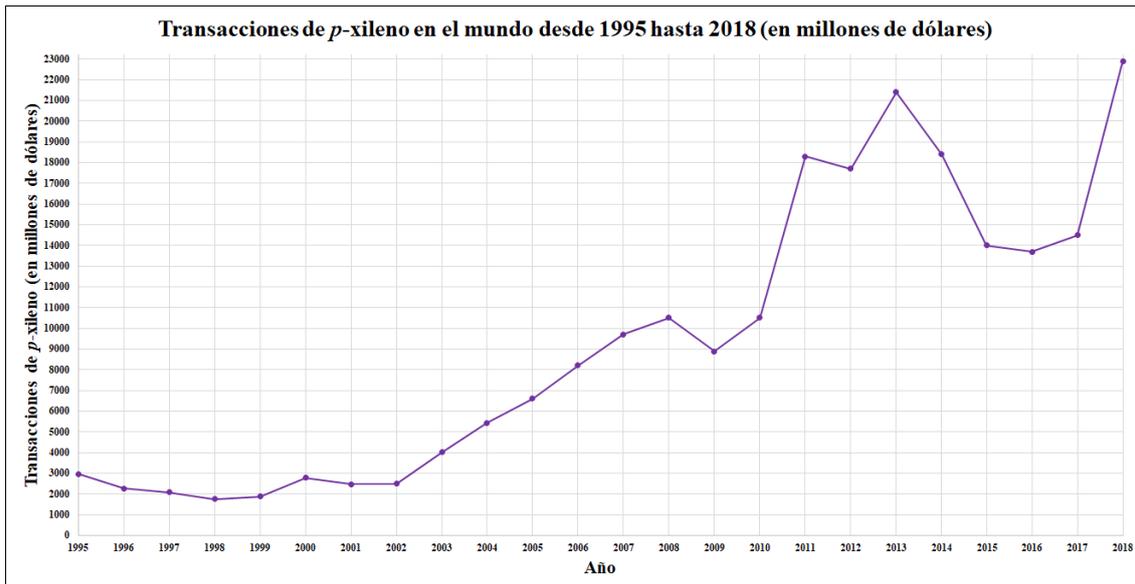


Figura 4.5. Evolución del valor total de las transacciones de *p*-xileno a nivel mundial (1995-2018).
Fuente: Adaptado de The Observatory of Economic Complexity [37].

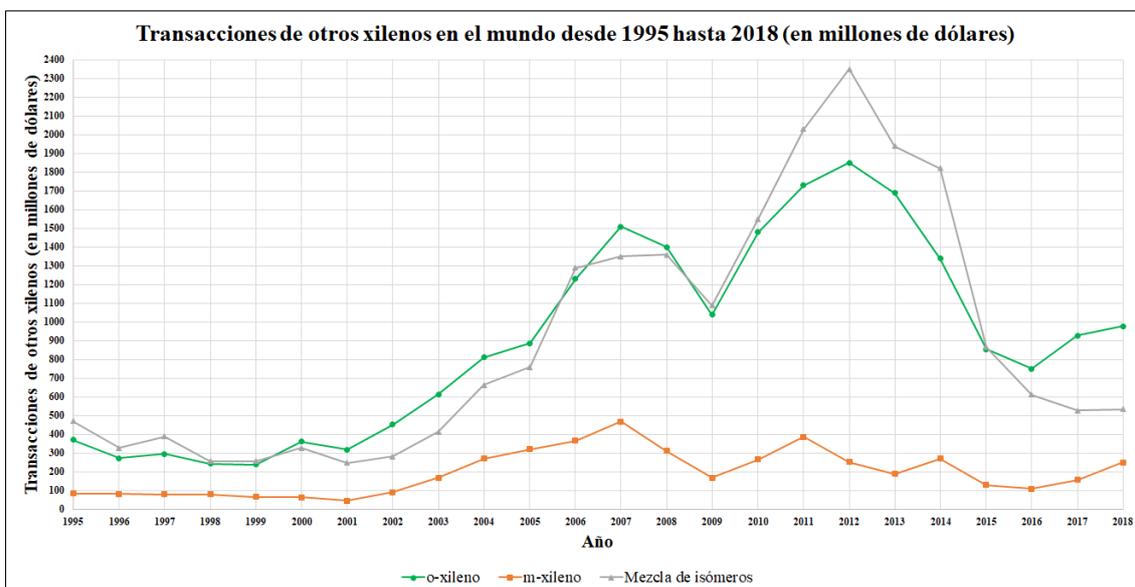


Figura 4.6. Evolución del valor total de las transacciones de otros xilenos a nivel mundial (1995-2018).
Fuente: Adaptado de The Observatory of Economic Complexity [37].

En los gráficos se observan tendencias crecientes en cada uno de los productos, incluyendo al metanol. A través de esto, que fue confirmado con los pronósticos de OEC [37], los cuales indican tendencias similares, se puede afirmar que la demanda y la comercialización de los productos se incrementará en los próximos años, así como la oferta y disponibilidad de metanol como materia prima para su uso en la producción de benceno, tolueno y xilenos.

Una observación importante para tomar en cuenta es la similitud gráfica en la evolución de las transacciones de BTX y la del petróleo crudo, mostrada en la Figura 4.7.

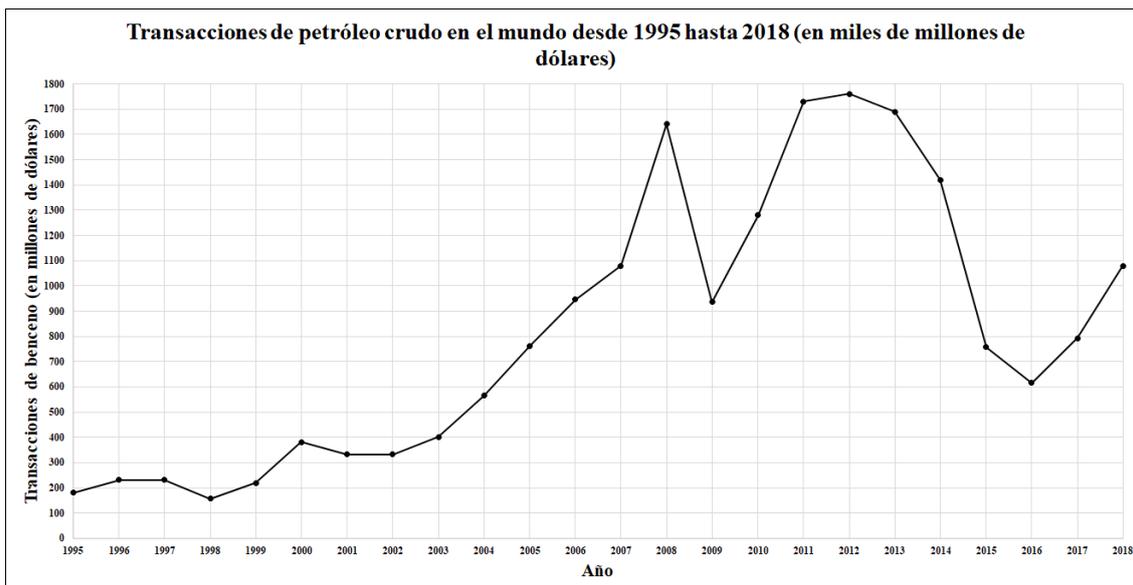


Figura 4.7. Evolución del valor total de las transacciones de petróleo crudo a nivel mundial (1995-2018).
Fuente: Adaptado de The Observatory of Economic Complexity [37].

La tendencia es proporcionalmente similar a la observada en el benceno, el tolueno y los xilenos, lo que sugiere nuevamente que estos productos dependen directamente del petróleo.

4.3. Principales países comercializadores de benceno, tolueno y xilenos

Conocer los orígenes y destinos más comunes de los productos permite identificar en qué países existe una mayor demanda de cada uno de ellos, así como en dónde se concentra una mayor producción. La información acerca de los países que se ubican en una posición dominante en la comercialización de mercancías es de gran valor e influye en la viabilidad de los procesos de producción según su ubicación geográfica, determinando que naciones se muestran como posibles competidores o clientes en el mercado. Para el análisis es necesario recalcar que la mayoría del benceno, el tolueno y los xilenos producidos en los diferentes países provienen del petróleo crudo como materia prima, que es un factor importante para tomar en cuenta si se propone el uso de nuevas tecnologías para su obtención a partir de metanol.

A nivel mundial, los países que predominan en la comercialización son diferentes para cada producto. En las Figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.18 y 4.19 se muestran los principales exportadores e importadores de benceno, tolueno, *o*-xileno, *m*-xileno, *p*-xileno y mezcla de isómeros de xileno, respectivamente.

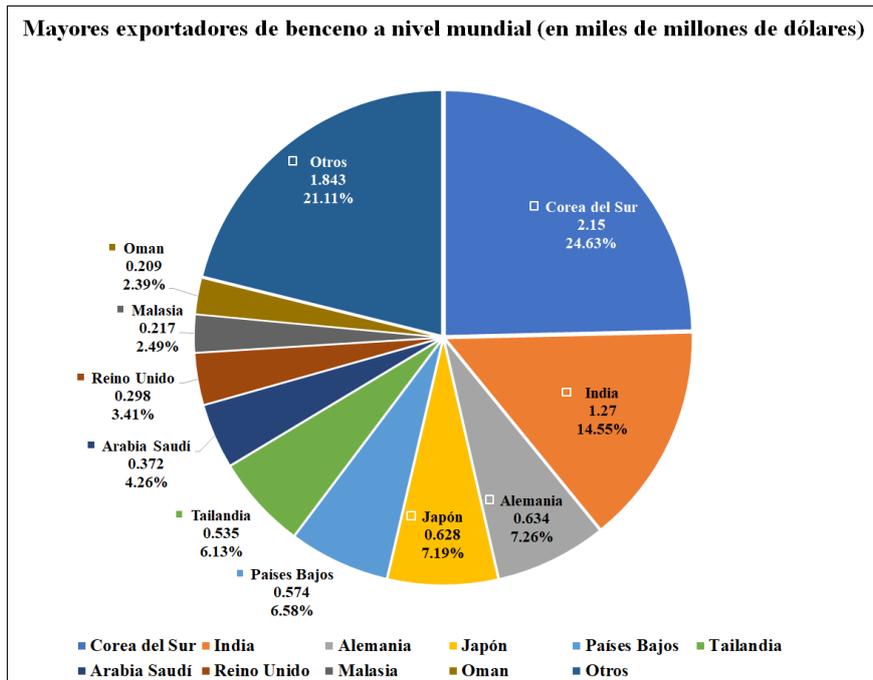


Figura 4.8. Países exportadores de benceno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

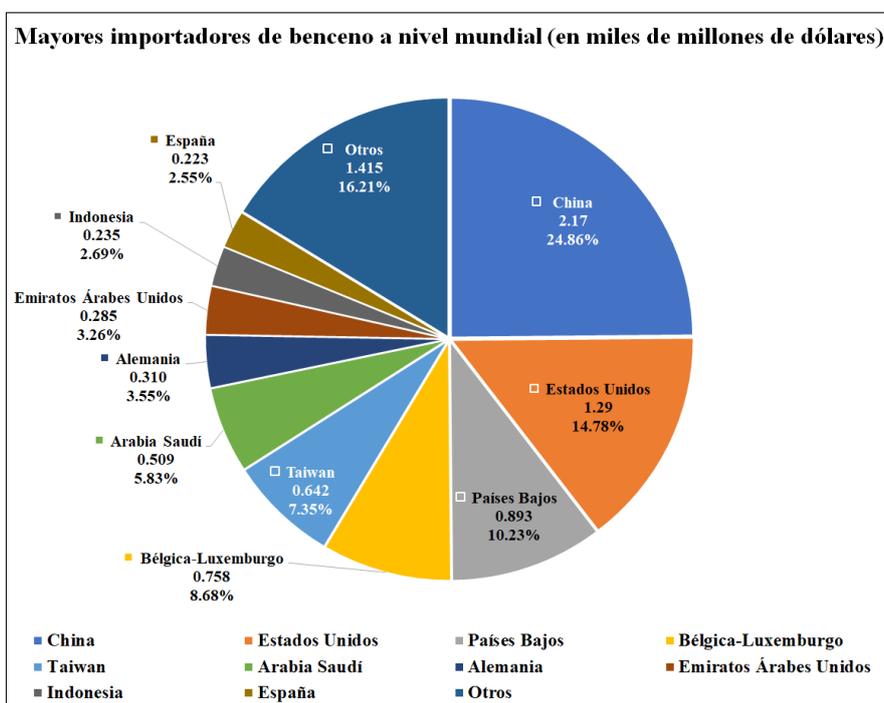


Figura 4.9. Países importadores de benceno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

En el caso del benceno, Corea del Sur es el principal exportador, representando el 24.63% de las exportaciones a nivel mundial, mientras que China, por otra parte, es el principal importador con el 24.86% de las importaciones. Entre los 10 países que más exportan e importan benceno se encuentran 7 y 5 países de Asia respectivamente,

demostrando que la comercialización de este producto se da mayormente en el continente mencionado. Cabe resaltar que los países de Europa también tienen una participación importante en las transacciones de benceno, principalmente en las importaciones. En los demás continentes la comercialización de benceno no es porcentualmente representativa para el total mundial, a excepción del caso de Estados Unidos, que es el segundo mayor importador de benceno con el 14.78% de las importaciones.

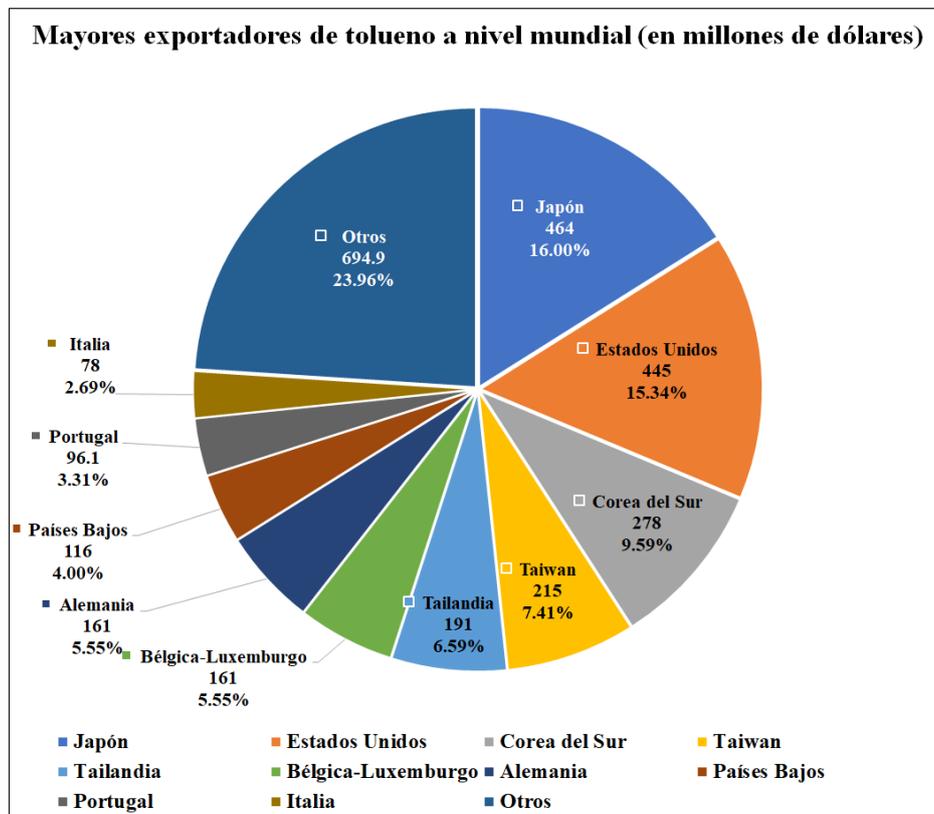


Figura 4.10. Países exportadores de tolueno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

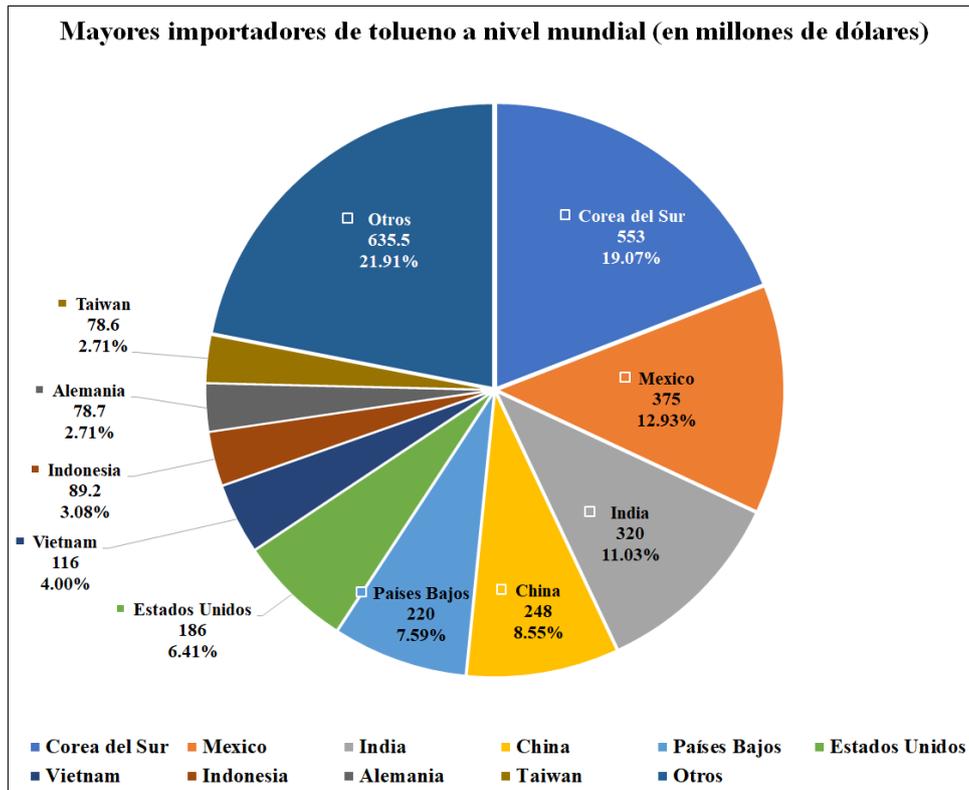


Figura 4.11. Países importadores de tolueno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

El tolueno presenta una situación parecida a la del benceno en cuanto a los países que figuran como los principales participantes en su comercialización. El mayor exportador de benceno a nivel mundial es Japón, con el 16.00% del total de exportaciones, seguido muy cerca por Estados Unidos, con 15.34%. Por otro lado, el mayor importador es Corea del Sur, con 19.07% de las importaciones, seguido de México, con 12.93%. Al igual que en el caso del benceno, Asia es el continente predominante en la comercialización de tolueno. Pese a que los datos de OEC [37] indican que Europa sigue superando a los otros continentes en las exportaciones, en América del Norte se concentra una mayor cantidad de importaciones que en Europa, y sus exportaciones tienen una mayor representatividad porcentual. La cercanía geográfica entre algunos países exportadores e importadores, como son los casos de Japón y Corea del Sur, o de Estados Unidos y México, indican que es posible que la comercialización de tolueno se dé entre países cercanos, en los que uno cumple el papel de productor y exportador, mientras que el otro demanda el producto para su uso en sus diferentes aplicaciones.

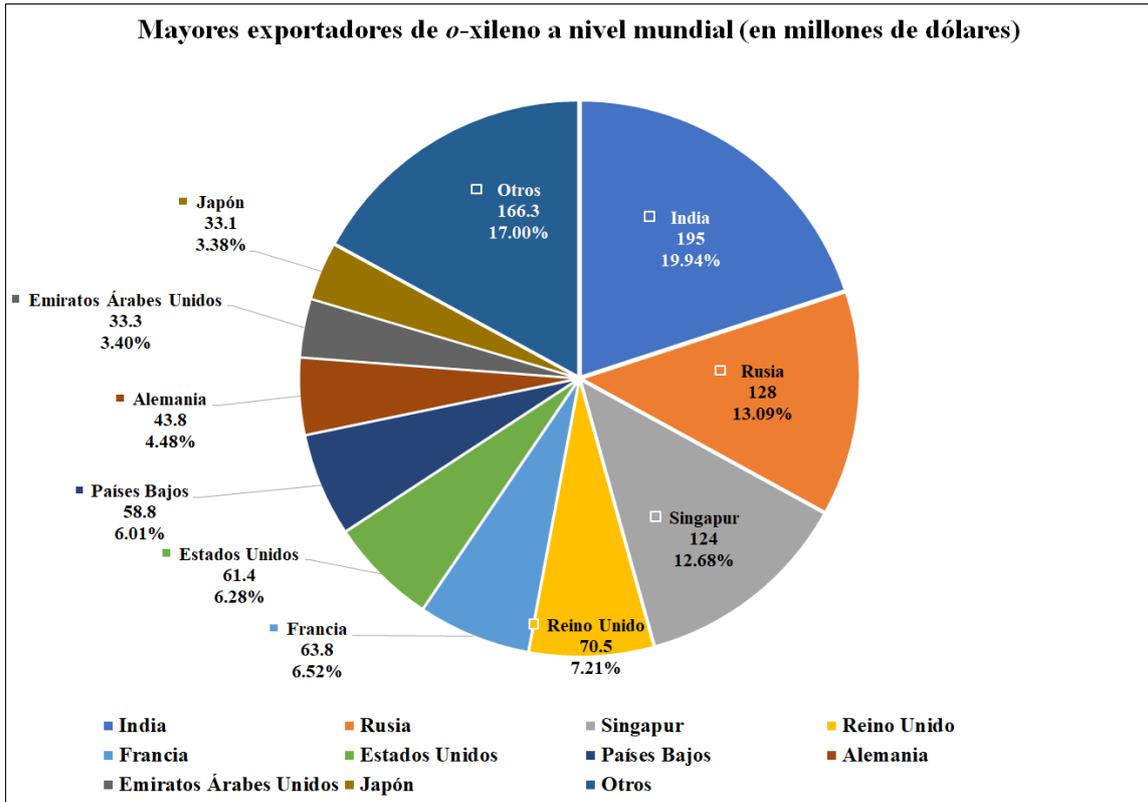


Figura 4.12. Países exportadores de *o*-xileno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

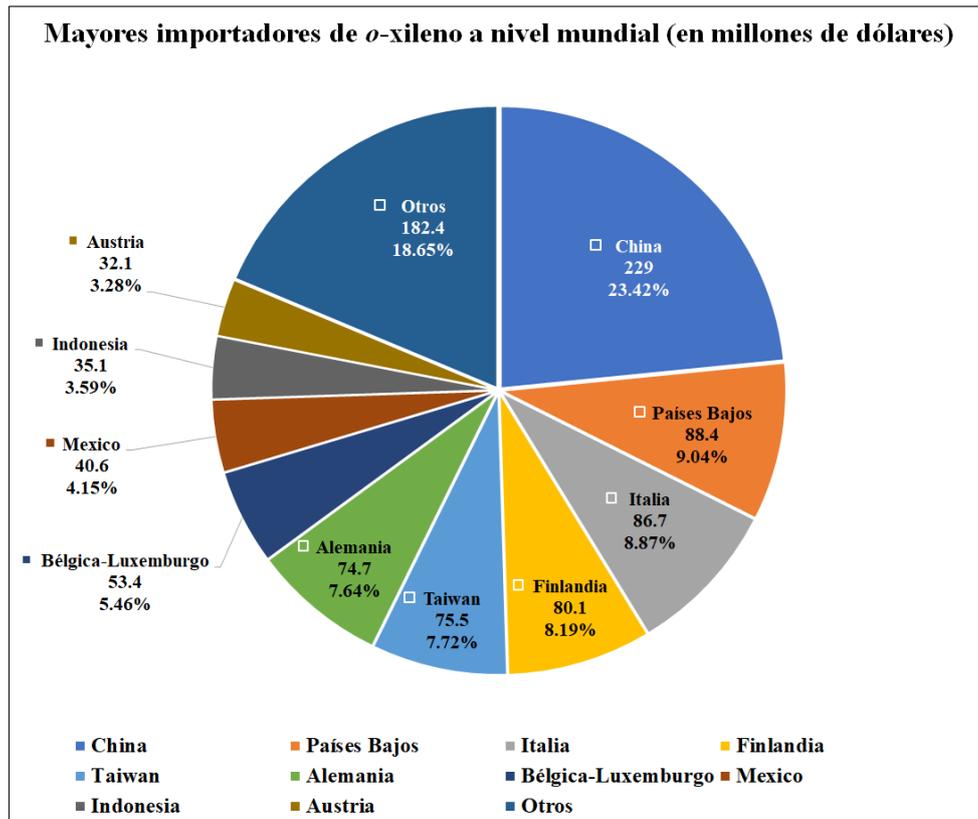


Figura 4.13. Países importadores de *o*-xileno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

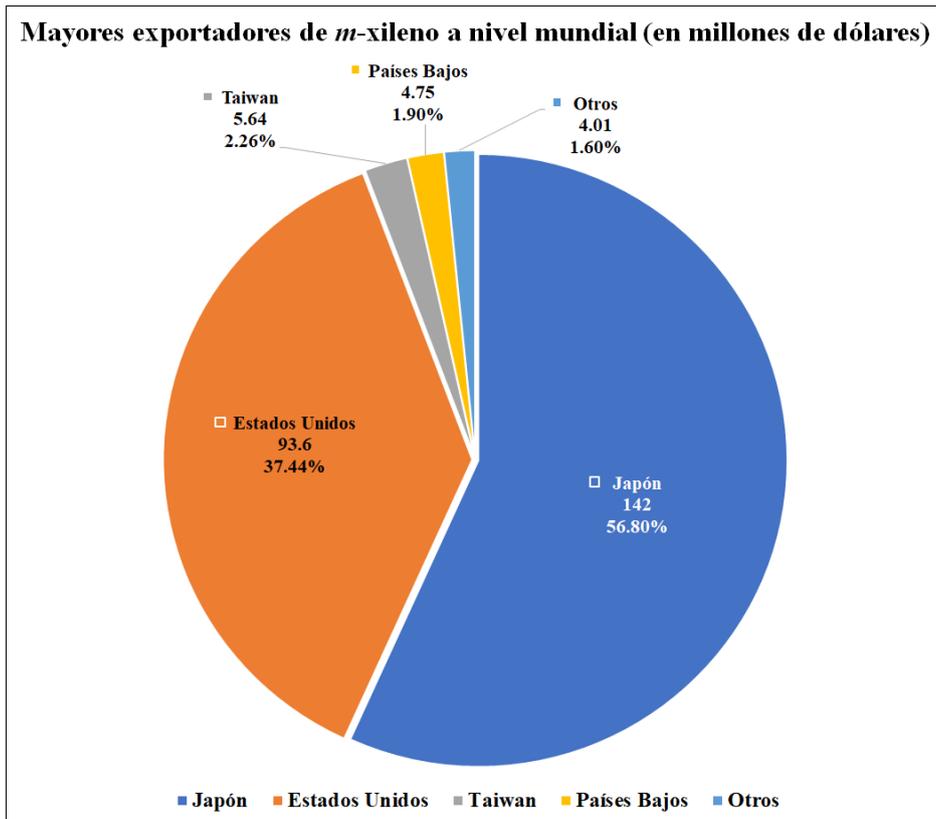


Figura 4.14. Países exportadores de *m*-xileno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

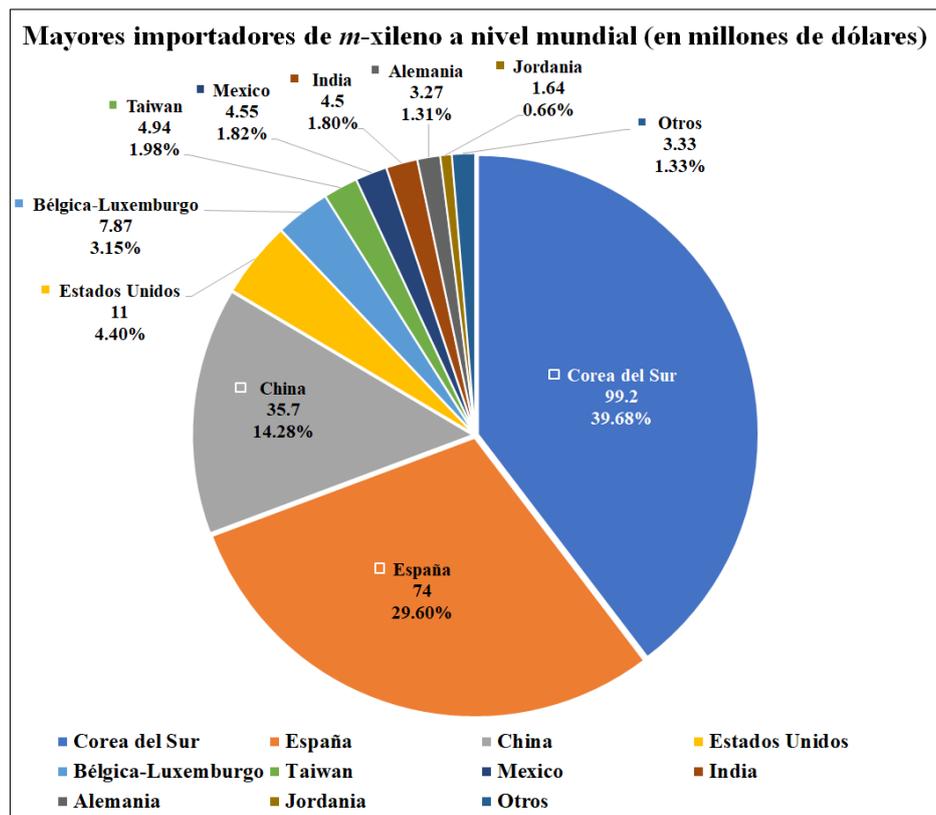


Figura 4.15. Países importadores de *m*-xileno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

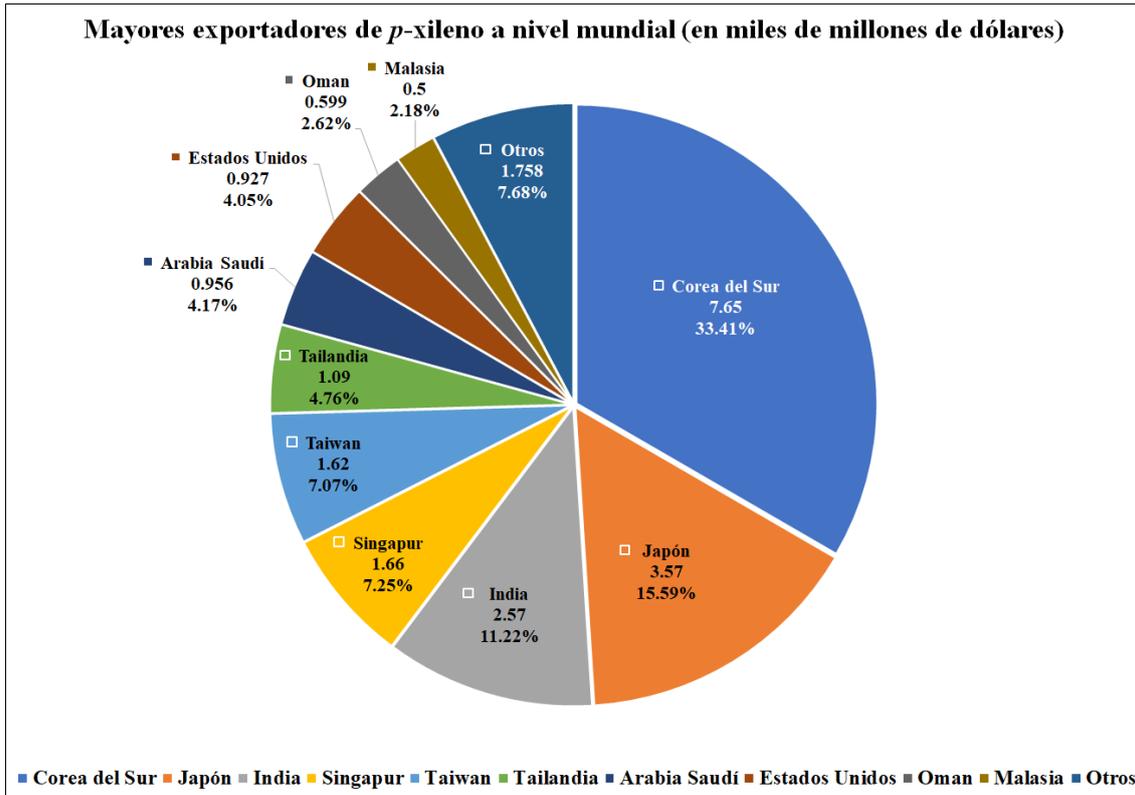


Figura 4.16. Países exportadores de *p*-xileno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

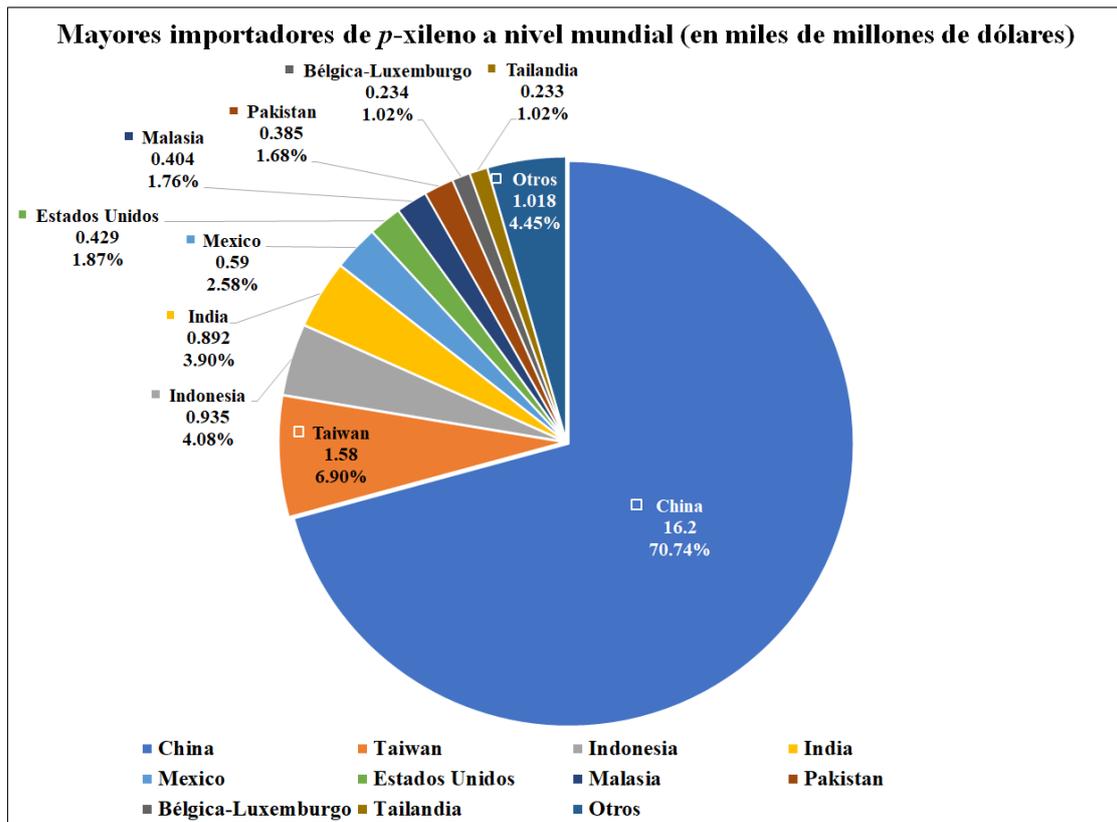


Figura 4.17. Países importadores de *p*-xileno a nivel mundial (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

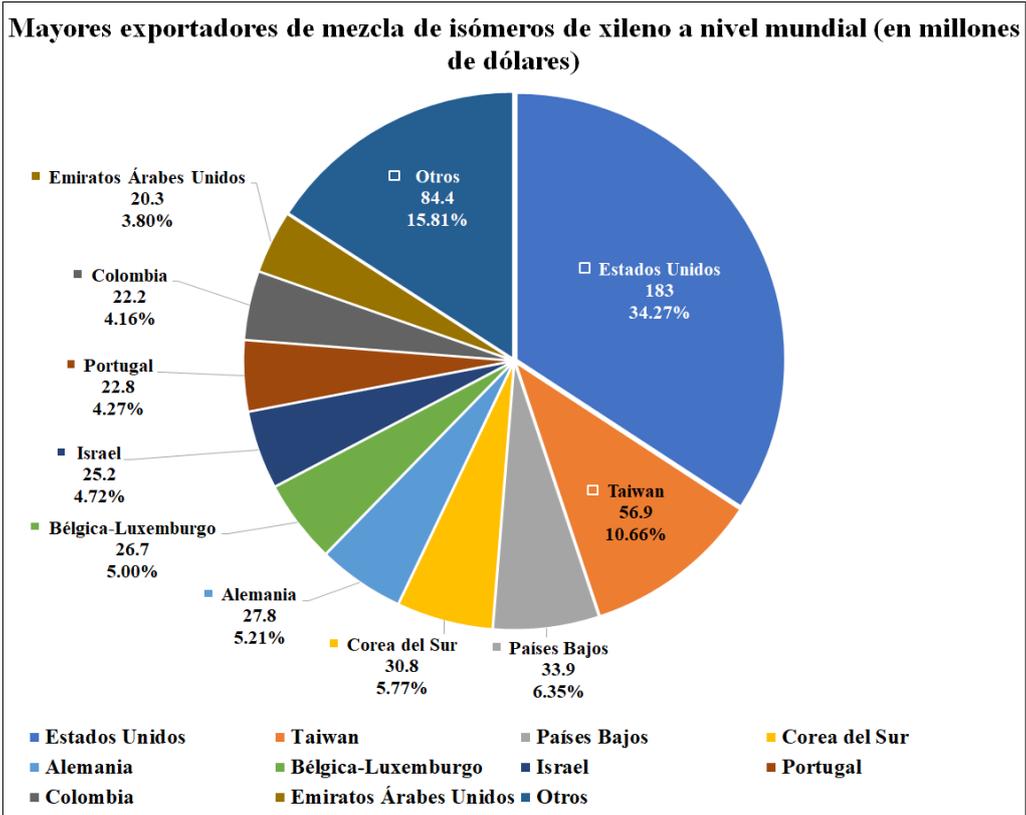


Figura 4.18. Países exportadores de mezcla de isómeros de xileno a nivel mundial (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

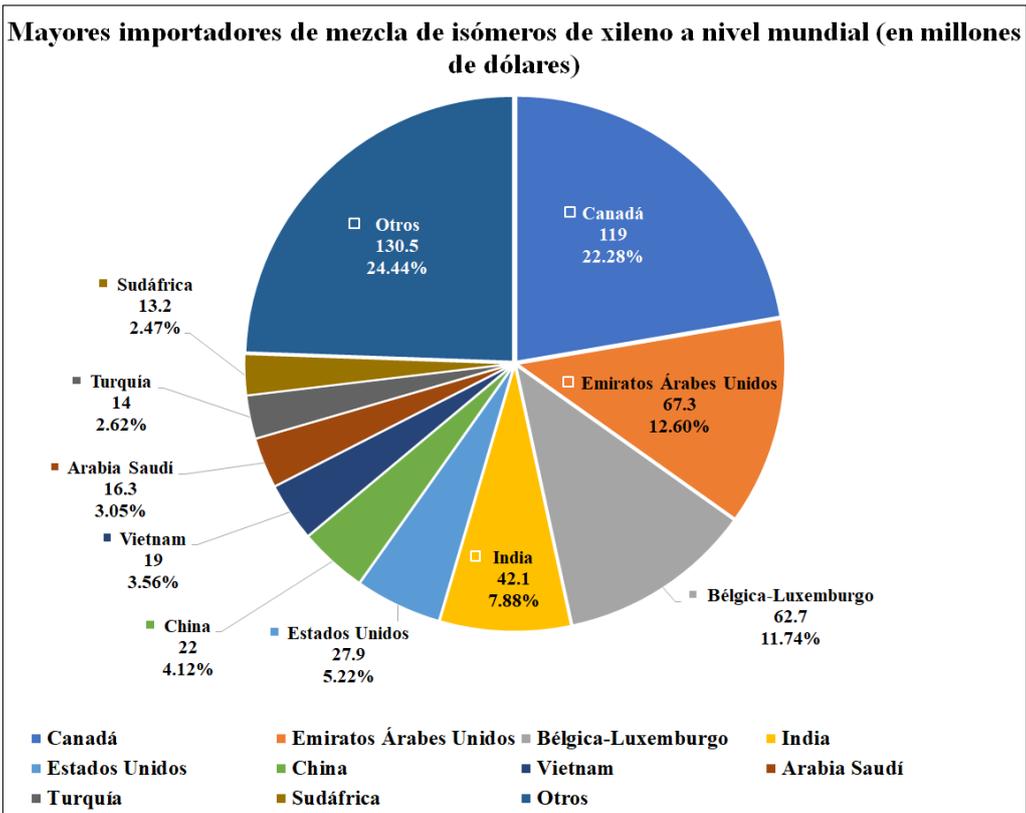


Figura 4.19. Países importadores de mezcla de isómeros de xileno a nivel mundial (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Los mercados de los xilenos muestran realidades distintas en cada caso. El *o*-xileno tiene sus transacciones distribuidas a nivel mundial de manera similar a los casos del benceno y del tolueno, es decir, Asia y Europa son los continentes que concentran la mayoría de la comercialización de este producto, siendo Asia donde se concentra la mayor parte de las exportaciones y Europa en donde se concentran la mayoría de las importaciones, tomando en cuenta que el total de transacciones tiene valores muy cercanos en ambos continentes para este caso. El mayor exportador es India, con el 19.94% de las exportaciones, mientras que el mayor importador es China, con el 23.42% de las importaciones. Cabe resaltar que el valor de las transacciones de *o*-xileno está en el orden de los millones de dólares anuales, que es considerablemente menor al valor de las transacciones de benceno y tolueno, que se encuentran en el orden de los miles de millones de dólares.

El *m*-xileno es el producto cuyas transacciones a nivel tienen un menor valor total, alcanzando únicamente los 250 millones de dólares anuales. La comercialización de este producto se reparte entre dos principales exportadores y tres principales importadores: Japón, que concentra el 56.80% de las exportaciones a nivel mundial; Estados Unidos, que concentra el 37.44% de las exportaciones; Corea del Sur, que es el mayor importador con el 39.68% de las importaciones; España, que posee el 29.60% de las importaciones; y China, con el 14.28% de las importaciones. La mayor parte de todo el comercio mundial de *m*-xileno se concentra entre los países mencionados, con una menor participación de otros países de Asia, Europa y Norteamérica.

El mercado que tiene mayor valor por las razones previamente mencionadas es el del *p*-xileno. El mayor exportador de este producto es Corea del Sur, con el 33.41% del total de exportaciones, mientras que el mayor importador es China, con el 70.74% de las importaciones. Las cifras dejan claro el marcado predominio de los países asiáticos en la comercialización de este producto, siendo los mayores productores y consumidores. Sin embargo, dado el valor total de las transacciones de 22.9 miles de millones de dólares, pese a que otros países, ubicados principalmente en Europa y América del Norte, poseen un porcentaje bajo de las transacciones totales, el valor total de las exportaciones o importaciones de *p*-xileno en estos países, según sea el caso, supera incluso al valor total de las transacciones de productos como el *m*-xileno o la mezcla de isómeros de xileno, y

esto es considerable y debe tomarse en cuenta al analizar una demanda de esta magnitud para un producto.

Finalmente, la comercialización de los xilenos como mezcla de isómeros tiene un mercado cuyo valor es mayor al del *m*-xileno, pero menor a los de los otros productos. El principal exportador es Estados Unidos, con el 34.27% de las exportaciones, y el principal importador es Canadá, con el 22.28% de las importaciones. Esto demuestra nuevamente que la cercanía geográfica es un factor importante en el intercambio de los productos. Asimismo, cabe resaltar que Asia y Europa mantienen un protagonismo similar al observado en los casos previamente analizados, y que América del Sur cuenta con porcentajes más representativos en las transacciones de mezcla de isómeros de xileno a nivel mundial.

Identificar los principales exportadores e importadores a nivel mundial da una visión global de cómo se da la comercialización de cada producto; sin embargo, también es importante conocer cómo se dan estas transacciones en cada región del mundo. La importancia de este análisis se debe a que es información de gran utilidad para determinar la viabilidad de un potencial proceso de obtención de estos productos según la ubicación geográfica seleccionada.

4.3.1. Principales exportadores e importadores en Asia

Como se identificó en el análisis previo, Asia es el continente que posee el mayor valor de exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en el mundo. La Tabla 4.1 muestra el porcentaje que Asia posee de las exportaciones e importaciones de los productos mencionados respecto al total mundial.

Producto	Porcentaje de las exportaciones totales	Porcentaje de las importaciones totales
Benceno	68.96 %	49.94%
Tolueno	55.86%	55.52%
<i>o</i> -Xileno	47.75%	44.17%
<i>m</i> -Xileno	60.00%	59.20%
<i>p</i> -Xileno	92.58%	91.27%
Mezcla de isómeros de xileno	33.90%	42.51%

Tabla 4.1. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en Asia representan respecto al total mundial.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Los altos porcentajes de Asia en las importaciones y exportaciones demuestran su predominio en las transacciones del mercado mundial, siendo ligeramente mayor el monto total de sus exportaciones, a excepción del caso de la mezcla de isómeros de xileno. Esta gran comercialización significa que Asia es el continente en el que más se producen y se utilizan el benceno, el tolueno y los xilenos, lo cual es consistente con el hecho de que varios de los estudios en torno a la obtención de estos compuestos a partir de metanol hayan sido realizados allá. La potencial implementación de un proceso de producción de los productos a partir de metanol en Asia o en algún otro lugar del planeta que tenga como objetivo exportarlos hacia algún país asiático implicaría una alta competencia frente a los mercados ya existentes basados en la obtención a partir de petróleo crudo, dado que, de manera general, es un continente mayormente productor y exportador.

Las Tablas 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 muestran los países que poseen las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos de mayor valor en Asia.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en miles de millones de dólares)
 Corea del Sur	2.15	 China	2.17
 India	1.27	 Taiwán	0.642
 Japón	0.628	 Arabia Saudí	0.509
 Tailandia	0.535	 Emiratos Árabes Unidos	0.285
 Arabia Saudí	0.372	 Indonesia	0.235
 Malasia	0.217	 Kuwait	0.105
 Omán	0.209	 Singapur	0.103
 Singapur	0.151	 Japón	0.102
 Israel	0.133	 Malasia	0.0914
 Turquía	0.0991	 Omán	0.038

Tabla 4.2. Mayores exportadores e importadores de benceno de Asia (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Con respecto al benceno, se observa que los exportadores de mayor relevancia en Asia son Corea del Sur e India, que también son los dos principales exportadores a nivel mundial; mientras que, en las importaciones, China es el principal importador de benceno en Asia y también a nivel mundial. Según los datos de OEC [37], la mayor parte de la comercialización se da entre países de este mismo continente; es decir, el benceno es exportado desde un país asiático hacia otro que lo requiera. Un ejemplo es la comercialización desde Corea del Sur hacia China, que representa un alto porcentaje de las transacciones en los casos de ambos países. Pese a que las transacciones de los demás países presentes en la Tabla 5.2 tienen un valor considerablemente menor al de los países antes mencionados, estos montos siguen siendo de varios millones de dólares, lo cual

hace que estos países también sean mercados de interés para el benceno. Otros países asiáticos también exportan e importan benceno en menores cantidades que, en algunos casos, posiblemente tengan un uso diferente a ser materia prima en grandes cantidades para un proceso industrial.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Japón	464	 Corea del Sur	553
 Singapur	287	 India	320
 Corea del Sur	278	 China	248
 Taiwán	215	 Vietnam	116
 Tailandia	191	 Indonesia	89.2
 Emiratos Árabes Unidos	60.6	 Taiwán	78.6
 Malasia	35.8	 Malasia	60.2
 Israel	26.5	 Turquía	52.1
 Filipinas	25.7	 Japón	20.6
 China	13.5	 Emiratos Árabes Unidos	9.19

Tabla 4.3. Mayores exportadores e importadores de tolueno de Asia (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

En cuanto al tolueno, Japón es el mayor exportador y Corea del Sur es el mayor importador. Al igual que en el caso del benceno, los datos de OEC [37] indican que gran parte de la comercialización se da entre parejas de países en las que uno cumple el rol de exportador y el otro de importador, tales como Japón y Corea del Sur, Singapur e India, entre otros en los que la mayor parte del tolueno se dirige o proviene de un país. El resto de los países involucrados en las transacciones de tolueno en cada país de Asia son

usualmente otros países asiáticos, lo que demuestra nuevamente que la comercialización se realiza dentro del mismo continente y entre países con cercanía geográfica.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 India	195	 China	229
 Singapur	124	 Taiwán	75.5
 Emiratos Árabes Unidos	33.3	 Indonesia	35.1
 Japón	33.1	 Malasia	29.1
 Taiwán	23	 Pakistán	26.1
 Israel	20.7	 India	16
 Corea del Sur	17.7	 Corea del Sur	10.2
 Tailandia	9.07	 Tailandia	6.79
 China	5.75	 Singapur	3.15
 Turquía	3.43	 Birmania	0.596

Tabla 4.4. Mayores exportadores e importadores de *o*-xileno de Asia (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Japón	142	 Corea del sur	99.2
 Taiwán	5.64	 China	35.7
 Emiratos Árabes Unidos	0.649	 Taiwán	4.94
 India	0.526	 India	4.5
 Singapur	0.274	 Jordania	1.64
 China	0.151	 Arabia Saudí	0.44
 Tailandia	0.15	 Tailandia	0.429
 Corea del Sur	0.111	 Malasia	0.265
 Malasia	0.0955	 Irak	0.0896
		 Singapur	0.0891

Tabla 4.5. Mayores exportadores e importadores de *m*-xileno de Asia (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones			Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de millones de dólares)		País	Valor total de importaciones (en miles de millones de dólares)
 Corea del Sur	7.65		 China	16.2
 Japón	3.57		 Taiwán	1.58
 India	2.57		 Indonesia	0.935
 Singapur	1.66		 India	0.892
 Taiwán	1.62		 Malasia	0.404
 Tailandia	1.09		 Pakistán	0.385
 Arabia Saudí	0.956		 Tailandia	0.233
 Omán	0.599		 Turquía	0.119
 Malasia	0.5		 Emiratos Árabes Unidos	0.0628
 Kuwait	0.396		 Japón	0.0451

Tabla 4.6. Mayores exportadores e importadores de *p*-xileno de Asia (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Taiwán	56.9	 Emiratos Árabes Unidos	67.3
 Corea del Sur	30.8	 India	42.1
 Israel	25.2	 China	22
 Emiratos Árabes Unidos	20.3	 Vietnam	19
 Japón	10.5	 Arabia Saudí	16.3
 Singapur	10.1	 Turquía	14
 India	8.12	 Corea del Sur	7.35
 Omán	7.69	 Malasia	6.86
 Tailandia	5.85	 Taiwán	6.78
 China	3.66	 Tailandia	4.74

Tabla 4.7. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de Asia (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Los xilenos presentan situaciones diferentes según cada isómero. La mezcla de isómeros de xileno se comercializa mayormente entre Taiwán y Emiratos Árabes Unidos, que son exportador e importador principal de este producto en Asia respectivamente. En los casos del *o*-xileno y el *m*-xileno se observan diferencias marcadas entre los países que ocupan el primer lugar en la clasificación según el valor de sus transacciones, ya sean exportaciones o importaciones, y el resto de los países de la lista, como son los casos de India (exportador) y China (importador) para el *o*-xileno, y de Japón (exportador) y Corea del Sur (importador) para el *m*-xileno, que son ampliamente los más representativos de Asia para estos productos. El *p*-xileno, cuyo mercado es el que más valor posee entre los productos de interés, tiene en Asia a Corea del Sur como mayor exportador y a China

como mayor importador, siendo ambos también los mayores a nivel mundial. Es importante resaltar con énfasis que China concentra el 70.74% de importaciones de *p*-xileno a nivel mundial, lo cual posiciona a este país como un gran mercado objetivo para quienes producen este compuesto; sin embargo, las importaciones de *p*-xileno hacia China provienen únicamente desde otros países de Asia, lo cual, por la cercanía geográfica, representaría un reto para un potencial proceso de obtención de este producto que se encuentre en una ubicación diferente.

Lo valioso del análisis de Asia radica en la alta representatividad de este continente respecto al total mundial para todos los productos de interés, tomando en cuenta que Corea del Sur y China son los países que, de manera global, más los exportan e importan respectivamente. Además, conocer que la comercialización se da mayormente dentro del mismo continente es un dato que debe tomarse en cuenta al determinar el mercado objetivo de un potencial proceso de obtención de benceno, tolueno y xilenos a partir de metanol, según el lugar en el que este se ubique.

4.3.2. Principales exportadores e importadores en Europa

Aunque es menor que la de los países asiáticos, la participación de los países de Europa en la comercialización de benceno, tolueno y xilenos es importante, siendo la segunda mayor a nivel mundial. La Tabla 4.8 muestra el porcentaje de participación de los países de Europa en las transacciones de los productos.

Producto	Porcentaje de las exportaciones totales	Porcentaje de las importaciones totales
Benceno	27.03%	34.14%
Tolueno	27.03%	19.93%
<i>o</i> -Xileno	43.87%	47.34%
<i>m</i> -Xileno	2.42%	34.40%
<i>p</i> -Xileno	3.46%	3.31%
Mezcla de isómeros de xileno	26.03%	18.56%

Tabla 4.8. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en Europa representan respecto al total mundial.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Los porcentajes muestran que Europa tiende a ser mayormente exportador en los casos del tolueno, *p*-xileno y mezcla de isómeros de xileno, mientras que realiza más importaciones de benceno, *o*-xileno y *m*-xileno, resaltando el caso de este último con una amplia diferencia. Al igual que en Asia, las transacciones en Europa son mayormente realizadas entre países del mismo continente, pero las diferencias entre el valor de las exportaciones e importaciones implican que la comercialización de estos productos tiene como origen o destino países de otros continentes, según sea el caso. En las Tablas 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14 se muestran los principales exportadores e importadores de los productos de interés en Europa.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Alemania	634	 Países Bajos	893
 Países Bajos	574	 Bélgica-Luxemburgo	758
 Reino Unido	298	 Alemania	310
 Bélgica-Luxemburgo	208	 España	223
 Polonia	152	 Italia	187
 Hungría	106	 Francia	184
 Ucrania	83.9	 Portugal	150
 Francia	65.2	 Reino Unido	104
 Italia	56.3	 República Checa	71.6
 Eslovaquia	38.3	 Letonia	30.6

Tabla 4.9. Mayores exportadores e importadores de benceno de Europa (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Alemania se posiciona como el principal exportador de benceno en Europa, con un valor de 634 millones de dólares, mientras que Países Bajos y la unión económica Bélgica-Luxemburgo son los principales importadores, con 893 y 758 millones de dólares en importaciones respectivamente. Según los datos de OEC [37], aunque la comercialización se realiza, al igual que en el caso de Asia, mayormente entre países de Europa, al ser un continente en el que las importaciones superan a las exportaciones, una fracción significativa de estas proviene de países ubicados en otros continentes, mayormente desde Asia, que domina el mercado de benceno. Las exportaciones, sin embargo, sí son dirigidas casi en su totalidad hacia otros países europeos, con ciertas

excepciones que tienen como destino países de los otros continentes, mayormente hacia Norteamérica.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Bélgica-Luxemburgo	161	 Países Bajos	220
 Alemania	161	 Alemania	78.7
 Países Bajos	116	 Bélgica-Luxemburgo	70.8
 Portugal	96.1	 Hungría	43.9
 Italia	78	 Estonia	28.4
 España	58	 Suiza	18.7
 Eslovaquia	28.5	 Polonia	18.6
 Francia	25.7	 Francia	16.9
 Polonia	11.8	 España	11.5
 Serbia	10.4	 Italia	9.8

Tabla 4.10. Mayores exportadores e importadores de tolueno de Europa (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

En el caso del tolueno sucede lo inverso a la situación del benceno en Europa, es decir, el valor de las exportaciones supera al de las importaciones. La unión económica Bélgica-Luxemburgo y Alemania con los principales exportadores de tolueno en Europa, con un valor de 161 millones de dólares cada uno, mientras que Países Bajos es el principal importador con 220 millones de dólares. Los países más protagonistas en la comercialización de tolueno en Europa son los mismos que en el caso del benceno, donde resalta que Alemania es exportador principal en ambos casos, Países Bajos es importador principal en ambos casos, y Bélgica-Luxemburgo es importador de benceno y exportador

de tolueno. Contrastando con la realidad del benceno, las exportaciones de tolueno se realizan principalmente a otros países de Europa, con un porcentaje significativo dirigido a Norteamérica, y las importaciones provienen casi en su totalidad de otros países de Europa [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Rusia	128	 Países Bajos	88.4
 Reino Unido	70.5	 Italia	86.7
 Francia	63.8	 Finlandia	80.1
 Países Bajos	58.8	 Alemania	74.7
 Alemania	43.8	 Bélgica-Luxemburgo	53.4
 Hungría	25.5	 Austria	32.1
 Bélgica-Luxemburgo	13.6	 Bielorrusia	17.7
 España	13.1	 Suecia	12
 Eslovaquia	6.6	 Bulgaria	5.84
 Finlandia	3.37	 República Checa	5.46

Tabla 4.11. Mayores exportadores e importadores de *o*-xileno de Europa (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Países Bajos	4.75	 España	74
 Portugal	1.04	 Bélgica-Luxemburgo	7.87
 Alemania	0.0847	 Alemania	3.27
 Bélgica-Luxemburgo	0.0488	 Dinamarca	0.476
 Suiza	0.045	 Italia	0.147
 Reino Unido	0.0401	 Países Bajos	0.0524
 España	0.0372	 Austria	0.0389
 Italia	0.0196	 Suiza	0.0274
 Eslovaquia	0.00294	 Rusia	0.00958
 Francia	0.00179		

Tabla 4.12. Mayores exportadores e importadores de *m*-xileno de Europa (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Rusia	292	 Bélgica-Luxemburgo	234
 Países Bajos	244	 Portugal	177
 Alemania	169	 Finlandia	127
 Bélgica-Luxemburgo	53.1	 España	122
 Francia	18.3	 Países Bajos	85.8
 España	13.3	 Bielorrusia	8.8
 Portugal	1.38	 Alemania	3.76
 Polonia	1.02	 Reino Unido	0.113

Tabla 4.13. Mayores exportadores e importadores de *p*-xileno de Europa (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Países Bajos	33.9	 Bélgica-Luxemburgo	62.7
 Alemania	27.8	 Países Bajos	7.36
 Bélgica-Luxemburgo	26.7	 Alemania	6.75
 Portugal	22.8	 Italia	4.27
 Polonia	7.72	 Francia	2.96
 Eslovenia	6.15	 Eslovenia	1.96
 España	3.63	 Austria	1.58
 Italia	3.35	 Grecia	1.16
 Rusia	2.56	 Suiza	1.15
 Francia	1.95	 Noruega	1.13

Tabla 4.14. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de Europa (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Los mercados del *o*-xileno y del *p*-xileno en Europa no difieren tanto en valor como a nivel mundial; en otras palabras, el *p*-xileno sigue superando ampliamente a los otros isómeros, pero es necesario considerar el mercado de *o*-xileno como significativo, que incluso supera a Asia en el porcentaje de importaciones a nivel mundial, convirtiéndose en el más importante como continente. Rusia es el principal exportador de *o*-xileno en Europa, mientras que Países Bajos, Italia, Finlandia y Alemania son los principales importadores. Para el caso del *o*-xileno se mantiene la tendencia de comercializar el producto dentro del mismo continente, aunque una parte de las exportaciones está dirigida a Asia [37]. En cuanto al *m*-xileno, solo Países Bajos y Portugal tienen un valor considerable de exportaciones de este producto, aunque

relativamente bajo (4.75 y 1.04 millones de dólares respectivamente) frente a los 74 millones de dólares en importaciones de España, que es el segundo mayor importador de *m*-xileno en el mundo. Rusia, Países Bajos y Alemania son los principales exportadores de *p*-xileno, mientras que Bélgica-Luxemburgo, Portugal, Finlandia y España son los principales importadores. Para el caso de la mezcla de isómeros de xileno existen varios exportadores con cantidades significativas, pero el importador principal en Europa es Bélgica-Luxemburgo. La comercialización del *m*-xileno, *p*-xileno y la mezcla de isómeros de xileno mantiene la tendencia de darse mayormente dentro de Europa; sin embargo, es importante considerar que en cada caso hay otros continentes involucrados en las transacciones. Las exportaciones de *m*-xileno van dirigidas mayormente hacia otros países de Europa y a algunos países de Asia, pero las importaciones provienen casi en su totalidad desde Estados Unidos. El *p*-xileno, además de los países europeos que son mayoría en su comercialización dentro de este continente, tiene como principal destino de exportación Estados Unidos, y países de Asia en las importaciones, representando porcentajes significativos en ambos casos, pese a ser superados por las transacciones entre países europeos. Finalmente, las importaciones de mezcla de isómeros de xileno provienen mayormente de otros países europeos, pero parte de las exportaciones se dirigen a Norteamérica y África.

4.3.3. Principales exportadores e importadores en América del Norte y Central

Las transacciones de benceno, tolueno y xilenos en América del Norte y Central son menos significativas que Asia y Europa respecto al total mundial, con algunas excepciones. En la Tabla 4.15 se muestran los porcentajes que la comercialización de cada producto en América del Norte y Central representa respecto al total mundial.

Producto	Porcentaje de las exportaciones totales	Porcentaje de las importaciones totales
Benceno	2.07%	15.58%
Tolueno	15.48%	22.14%
<i>o</i> -Xileno	7.73%	5.76%
<i>m</i> -Xileno	37.44%	6.32%
<i>p</i> -Xileno	4.17%	4.45%
Mezcla de isómeros de xileno	34.64%	31.09%

Tabla 4.15. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en América del Norte y Central representan respecto al total mundial.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Se observa que en esta zona del planeta predominan las importaciones, aunque en el caso del *m*-xileno las exportaciones son mucho mayores, siendo la segunda zona con mayores exportaciones de este producto después de Asia. En cuanto a la mezcla de isómeros de xileno, América del Norte y Central concentra la mayor cantidad de exportaciones y la segunda mayor cantidad de importaciones, mientras que en el mercado de tolueno supera a Europa en importaciones. De manera global, América del Norte y Central ocupa el tercer lugar entre los continentes en los que más se comercializan el benceno, el tolueno y los xilenos. Las Tablas 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 muestran a los principales países exportadores e importadores de los productos de interés en América del Norte y Central.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en miles de millones de dólares)
 Canadá	85.2	 Estados Unidos	1.29
 Estados Unidos	82.9	 Canadá	0.0707
 México	12.6	 México	0.000207

Tabla 4.16. Mayores exportadores e importadores de benceno de América del Norte y Central (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Como se observa en las tablas, en América del Norte existen tres países que predominan en las transacciones de benceno, tolueno y xilenos: Estados Unidos, Canadá y México, siendo el primero el más representativo del continente a nivel mundial. El caso del benceno es una clara demostración de lo mencionado, dado que solo estos tres países realizan transacciones de este producto, con un mayor valor en sus importaciones, de 1.36 miles de millones de dólares, frente a los 181 millones de dólares en exportaciones. El principal importador de benceno en Norteamérica es Estados Unidos, mayormente desde Asia y en menores cantidades desde Sudamérica, Europa y otros países de Norteamérica como Canadá [37]. En las exportaciones, Canadá se sitúa como el mayor exportador, seguido de cerca por Estados Unidos, y luego por México. La totalidad del benceno que se exporta desde Canadá y México tiene como destino Estados Unidos, mientras que, desde Estados Unidos, va hacia Norteamérica, Asia, Europa y Sudamérica [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Estados Unidos	445	 México	375
 México	2.63	 Estados Unidos	186
 Canadá	0.874	 Canadá	60.3
		 Guatemala	7
		 República Dominicana	5.22
		 Costa Rica	2.24
		 El Salvador	2.24
		 Honduras	1.44
		 Jamaica	1.03
		 Panamá	0.839

Tabla 4.17. Mayores exportadores e importadores de tolueno de América del Norte y Central (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

En el caso del tolueno, Estados Unidos es el mayor exportador de América del Norte y Central por amplia diferencia, mientras que México es el mayor importador. Ambos países se ubican en segundo lugar de exportaciones e importaciones a nivel mundial respectivamente, y la comercialización de este producto se da mayormente dentro del mismo continente, manteniendo la tendencia observada en Asia y Europa [37]. Cabe resaltar que América del Norte y Central es mayormente importador de benceno y tolueno.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Estados Unidos	61.4	 México	40.6
 Canadá	13.8	 Estados Unidos	14.8
 México	0.138	 Canadá	0.427
 Nicaragua	0.0907	 Cuba	0.133
 República Dominicana	0.0341	 El Salvador	0.129
		 Honduras	0.0907
		 Costa Rica	0.0229
		 Guatemala	0.0196
		 Barbados	0.0132
		 Trinidad y Tobago	0.0073

Tabla 4.18. Mayores exportadores e importadores de *o*-xileno de América del Norte y Central (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Estados Unidos	93.6	 Estados Unidos	11
		 México	4.55
		 Guatemala	0.0783
		 Costa Rica	0.0755
		 Canadá	0.0354

Tabla 4.19. Mayores exportadores e importadores de *m*-xileno de América del Norte y Central (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Estados Unidos	927	 México	590
 Canadá	27.6	 Estados Unidos	429

Tabla 4.20. Mayores exportadores e importadores de *p*-xileno de América del Norte y Central (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Estados Unidos	183	 Canadá	119
 Nicaragua	1.01	 Estados Unidos	27.9
 México	0.551	 México	9.32
 Canadá	0.486	 Costa Rica	5.47
		 Guatemala	1.23
		 República Dominicana	0.952
		 El Salvador	0.553
		 Trinidad y Tobago	0.372
		 Cuba	0.15
		 Panamá	0.148

Tabla 4.21. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de América del Norte y Central (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

La comercialización de xilenos en esta zona del planeta se realiza con un gran protagonismo de Estados Unidos como exportador principal de todos los isómeros, principalmente en el caso del *p*-xileno, con un valor de exportaciones de 927 millones de dólares. Por otra parte, México es el mayor importador en la mayoría de los casos, quedando detrás de Estados Unidos en el caso del *m*-xileno, mientras que Canadá es el mayor importador de mezcla de isómeros de xileno. Cabe resaltar que Estados Unidos destaca como el segundo mayor exportador de *m*-xileno del mundo y como el mayor exportador de mezcla de isómeros de xileno, mientras que Canadá es el mayor importador de este último producto. Asimismo, se mantiene la tendencia de comercializar los productos entre países de la misma zona geográfica [37].

Pese a que América del Norte y Central es menos representativo que Asia y Europa en la comercialización de los productos de interés a nivel mundial, es un mercado importante para los xilenos, sobre todo para el *m*-xileno y para la mezcla de isómeros de xileno, productos en los que supera a varios países de Asia y Europa, sobre todo por las transacciones de Estados Unidos, Canadá y México.

4.3.4. Principales exportadores e importadores en América del Sur

En Sudamérica, la comercialización internacional de productos como el benceno, el tolueno y los xilenos se realiza en menores cantidades que en continentes como Asia y Europa, incluso menos que en América del Norte y Central. La Tabla 4.22 muestra la representatividad de América del Sur frente al total de transacciones de los productos de interés en el mundo.

Producto	Porcentaje de las exportaciones totales	Porcentaje de las importaciones totales
Benceno	1.82%	0.28%
Tolueno	1.57%	0.56%
<i>o</i> -Xileno	0.64%	1.62%
<i>m</i> -Xileno	0.00%	0.02%
<i>p</i> -Xileno	0.12%	0.86%
Mezcla de isómeros de xileno	5.28%	3.90%

Tabla 4.22. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en América del Sur representan respecto al total mundial.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Como se puede observar, el porcentaje que América del Sur representa es bastante bajo. Pese a esto, es importante conocer qué países exportan e importan los productos, para saber cómo se comporta el mercado en esta zona del mundo. En las Tablas 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27 y 4.28 se muestran los países que más exportan e importan benceno, tolueno y xilenos en Sudamérica.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Brasil	148	 Argentina	16.9
 Colombia	10.6	 Venezuela	7.47
 Venezuela	0.712	 Chile	0.0746
 Chile	0.0591	 Brasil	0.0246
		 Ecuador	0.0734
		 Colombia	0.0024

Tabla 4.23. Mayores exportadores e importadores de benceno de América del Sur (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Los datos muestran que Brasil es el protagonista sudamericano en la comercialización de benceno, tolueno y xilenos; aunque, para algunos productos, otros países también cumplen roles importantes en el mercado. En el caso del benceno, las exportaciones superan ampliamente a las importaciones en América del Sur, siendo Brasil y Argentina los mayores exportador e importador respectivamente. Colombia y Venezuela ocupan el segundo lugar en exportaciones e importaciones en América del Sur respectivamente y, aunque con un valor menor que los países que ocupan los primeros lugares, representan mercados a tomar en cuenta para este producto. En las exportaciones existe una tendencia diferente a la normalmente observada en otros continentes, puesto que la mayoría del benceno exportado desde países como Brasil y Colombia se dirige hacia Estados Unidos, mientras que otros porcentajes menores se exportan hacia otros países de América del Sur. Por otro lado, en el caso de las importaciones, Argentina importa casi la totalidad de benceno desde Brasil, mientras que Venezuela realiza lo mismo desde Estados Unidos [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Colombia	29.9	 Perú	4.69
 Brasil	12.4	 Ecuador	3.87
 Argentina	0.0031	 Chile	2.19
		 Argentina	1.5
		 Paraguay	1.18
		 Brasil	1.12
		 Bolivia	0.552
		 Guyana	0.541
		 Uruguay	0.531
		 Colombia	0.0616

Tabla 4.24. Mayores exportadores e importadores de tolueno de América del Sur (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

En el caso del tolueno, Colombia y Brasil son los principales exportadores, mientras que Perú es el mayor importador, seguido de Ecuador, Chile, Argentina y Paraguay. Las exportaciones se realizan en cantidades similares hacia Norteamérica y hacia otros países de América del Sur, mientras que las importaciones provienen mayormente de otros países de Sudamérica, como es el caso de Perú y Ecuador, que importan tolueno desde Colombia [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Brasil	6.16	 Brasil	13
 Argentina	0.0712	 Chile	2.06
 Venezuela	0.00737	 Colombia	0.308
		 Perú	0.278
		 Guyana	0.0731
		 Paraguay	0.00556
		 Venezuela	0.0022
		 Argentina	0.00208

Tabla 4.25. Mayores exportadores e importadores de *o*-xileno de América del Sur (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Importaciones	
País	Valor total de importaciones (en miles de dólares)
 Colombia	50.2
 Brasil	2.05

Tabla 4.26. Mayores importadores de *m*-xileno de América del Sur (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Brasil	27	 Brasil	196
		 Chile	1.33

Tabla 4.27. Mayores exportadores e importadores de *p*-xileno de América del Sur (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Colombia	22.2	 Chile	5.77
 Argentina	4.63	 Perú	5.32
 Brasil	1.34	 Ecuador	4.25
 Venezuela	0.0413	 Venezuela	3.75
 Ecuador	0.0293	 Argentina	0.704
		 Brasil	0.542
		 Paraguay	0.132
		 Bolivia	0.132
		 Colombia	0.11
		 Uruguay	0.0512

Tabla 4.28. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de América del Sur (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Para el caso del *o*-xileno, Brasil predomina en exportaciones e importaciones, diferenciándose en el origen y el destino de estas: las exportaciones se dirigen hacia Asia, mientras que las importaciones provienen desde Europa y Norteamérica [37]. Los datos de OEC [37] no muestran a ningún país sudamericano como exportador de *m*-xileno, no obstante, Colombia realizó importaciones por 50.2 miles de dólares, y Brasil por 2.05 miles de dólares, cantidades que son muy poco relevantes para el mercado del producto. Brasil también predomina en las transacciones de *p*-xileno, siendo mayormente importador desde Estados Unidos [37]. La mezcla de isómeros de xileno es el producto cuya comercialización internacional es la más relevante en América del Sur, con Colombia como principal exportador, seguido de Argentina y Brasil, y Chile, Perú, Ecuador y Venezuela como principales importadores. Las transacciones de este último producto se realizan mayormente entre países de la misma zona geográfica, aunque un porcentaje considerable tiene como origen o destino América del Norte.

4.3.5. Principales exportadores e importadores en África

Al igual que América del Sur, África es un continente poco representativo para la comercialización mundial de benceno, tolueno y xilenos. La Tabla 4.29 muestra el porcentaje que las transacciones en África representan respecto al total mundial.

Producto	Porcentaje de las exportaciones totales	Porcentaje de las importaciones totales
Benceno	0.15%	0.10%
Tolueno	0.02%	1.64%
<i>o</i> -Xileno	0.02%	1.09%
<i>m</i> -Xileno	0.06%	0.22%
<i>p</i> -Xileno	0.00%	0.08%
Mezcla de isómeros de xileno	0.05%	3.71%

Tabla 4.29. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en África representan respecto al total mundial.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Es importante destacar que, pese a la baja representatividad de este continente frente al mundo, las importaciones superan a las exportaciones, y esto implica una mayor demanda internacional de los productos de interés, razón por la cual es un mercado potencial para estos. Las Tablas 4.30, 4.31, 4.32, 4.33, 4.34 y 4.35 muestran a los principales exportadores e importadores de benceno, tolueno y xilenos en África.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en millones de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Argelia	12.5	 Egipto	4.53
 Sudáfrica	0.485	 Tanzania	1.87
 Mauricio	0.0018	 Nigeria	0.876
		 Uganda	0.567
		 Zimbabue	0.429
		 Sudáfrica	0.199
		 Malawi	0.0206
		 Zambia	0.00835
		 Mauricio	0.00815
		 Mozambique	0.00736

Tabla 4.30. Mayores exportadores e importadores de benceno de África (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

En todos los casos existen pocos países exportadores y varios importadores, aunque algunos destacan con un mayor valor de transacciones para cada producto. En el caso del benceno, Argelia exportó 12.5 millones de dólares, convirtiéndose en el principal exportador de este producto en África, mientras que Egipto y Tanzania son los principales importadores. Solo en el caso del benceno las exportaciones superan en valor a las importaciones en este continente. El destino de las exportaciones es mayormente Europa, mientras que las importaciones provienen mayormente de países de Asia [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Sudáfrica	550	 Sudáfrica	15.9
 Túnez	50.7	 Nigeria	8.4
 Kenia	35.9	 Marruecos	6.84
		 Costa de Marfil	5.1
		 Túnez	2.21
		 Egipto	2.02
		 Kenia	1.72
		 Ghana	1.59
		 Uganda	0.987
		 Tanzania	0.482

Tabla 4.31. Mayores exportadores e importadores de tolueno de África (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Las exportaciones de tolueno están en el orden de los miles de dólares, y son poco relevantes para el mercado total de este producto; sin embargo, las importaciones, que provienen principalmente de Europa y Asia [37], sí tienen un valor considerable, con Sudáfrica, Nigeria, Marruecos y Costa de Marfil como principales países importadores.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Sudáfrica	150	 Sudáfrica	8.91
 Egipto	10	 Marruecos	1.17
		 Zimbabue	0.139
		 Angola	0.136
		 Egipto	0.115
		 Benín	0.0992
		 Tanzania	0.0621
		 Mauricio	0.0219
		 Uganda	0.0133
		 Liberia	0.00858

Tabla 4.32. Mayores exportadores e importadores de *o*-xileno de África (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de dólares)	País	Valor total de importaciones (en miles de dólares)
 Sudáfrica	128	 Egipto	164
 Kenia	29	 Uganda	142
		 Zimbabue	128
		 Nigeria	84.9
		 Kenia	13.9
		 Tanzania	7.5
		 Mauricio	3.69
		 Madagascar	2.6
		 Sudáfrica	2.39
		 Túnez	1.79

Tabla 4.33. Mayores exportadores e importadores de *m*-xileno de África (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Mauricio	8.87	 Yibuti	5.35
 Sudáfrica	2.28	 Sudáfrica	4.01
		 Kenia	3.6
		 Sudán	2.95
		 Eritrea	0.972
		 Egipto	0.257
		 Senegal	0.0229
		 Mauricio	0.0228
		 Angola	0.0115
		 Seychelles	0.00887

Tabla 4.34. Mayores exportadores e importadores de *p*-xileno de África (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Sudáfrica	177	 Sudáfrica	13.2
 Tanzania	59.5	 Egipto	1.83
 Kenia	38	 Nigeria	1.05
 Marruecos	5.14	 Marruecos	0.981
 Costa de Marfil	4.79	 Tanzania	0.392
 Uganda	4.35	 Kenia	0.389
		 Uganda	0.358
		República	
		 Democrática del Congo	0.35
		 Senegal	0.131
		 Yibuti	0.112

Tabla 4.35. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de África (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

El caso del *o*-xileno es similar al del tolueno en África, con la diferencia de que el origen de las importaciones es Europa casi en su totalidad [37]. Los principales importadores de *o*-xileno en este continente son Sudáfrica y Marruecos. El valor de las transacciones de *m*-xileno en África es bastante bajo en exportaciones e importaciones, mientras que el *p*-xileno mantiene la misma tendencia que el *o*-xileno, con un diferente origen de las importaciones, que es Asia [37]. Los principales importadores de *p*-xileno en África son Yibuti, Sudáfrica, Kenia y Sudán. Al igual que para la mayoría de los xilenos, la mezcla de isómeros de xileno tiene un mayor valor en sus importaciones en África, con Sudáfrica como principal importador, seguido de Egipto, Nigeria y

Marruecos. Las importaciones de este último producto provienen mayormente de Europa y de Asia [37].

4.3.6. Principales exportadores e importadores en Oceanía

Oceanía es una zona geográfica del mundo cuyos países están conformados por islas. La mayoría de estas islas son pequeñas, y esto da lugar a una muy baja representatividad mundial frente a la comercialización total de diversos productos, incluyendo al benceno el tolueno y los xilenos. La Tabla 4.36 muestra qué porcentajes de las transacciones totales de los productos de interés corresponden a Oceanía.

Producto	Porcentaje de las exportaciones totales	Porcentaje de las importaciones totales
Benceno	0.00%	0.00%
Tolueno	0.01%	0.46%
<i>o</i> -Xileno	0.00%	0.02%
<i>m</i> -Xileno	0.00%	0.00%
<i>p</i> -Xileno	0.00%	0.00%
Mezcla de isómeros de xileno	0.01%	0.32%

Tabla 4.36. Porcentaje que las exportaciones e importaciones de benceno, tolueno y xilenos en Oceanía representan respecto al total mundial.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Como se puede observar, el valor de las exportaciones es despreciable, y sucede lo mismo en la mayoría de los casos para las importaciones. A pesar de que esto convierte a Oceanía en un continente poco interesante para la comercialización de benceno, tolueno y xilenos, es útil conocer qué países son los que demandan o exportan en pequeñas cantidades estos productos. En las Tablas 4.37, 4.38 y 4.39 se muestran los principales exportadores e importadores de tolueno y xilenos en Oceanía.

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de dólares)	País	Valor total de importaciones (en millones de dólares)
 Australia	102	 Australia	11
 Nueva Zelanda	80.9	 Nueva Zelanda	1.99
		 Fiyi	0.251
		 Polinesia Francesa	0.0327
		 Papúa Nueva Guinea	0.0186
		 Nueva Caledonia	0.00214

Tabla 4.37. Mayores exportadores e importadores de tolueno de Oceanía (2018).

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Los datos de OEC [37] indican que no se realizan exportaciones de benceno en Oceanía, y que solamente Australia realizó importaciones por 30.3 miles de dólares desde China y Estados Unidos, lo cual hace a la comercialización internacional de este producto despreciable en este continente. El tolueno, por su parte, tiene a Australia y Nueva Zelanda como principales importadores, con 11 millones de dólares y 1.99 millones de dólares respectivamente. La mayor parte de estas importaciones provienen desde Asia [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de dólares)	País	Valor total de importaciones (en miles de dólares)
 Nueva Zelanda	1.1	 Australia	155
		 Fiyi	5.78
		 Nueva Zelanda	4.75

Tabla 4.38. Mayores exportadores e importadores de *o*-xileno de Oceanía (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

Exportaciones		Importaciones	
País	Valor total de exportaciones (en miles de dólares)	País	Valor total de importaciones (en miles de dólares)
 Australia	57.3	 Australia	818
 Nueva Zelanda	1.57	 Nueva Zelanda	737
		 Fiyi	118
		 Nueva Caledonia	14.2
		 Papúa Nueva Guinea	9.41

Tabla 4.39. Mayores exportadores e importadores de mezcla de isómeros de xileno de Oceanía (2018).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de The Observatory of Economic Complexity [37].

En el caso de los xilenos, no se reportan exportaciones ni importaciones de *p*-xileno. Solo Australia realizó importaciones de *m*-xileno por escasos 3.32 miles de dólares, mientras que, en los casos del *o*-xileno y la mezcla de isómeros de xileno, Australia, Nueva Zelanda y Fiyi son los países que más participan en las transacciones, aunque con valores mínimos en el orden de los miles de dólares.

4.4. Precios del benceno, el tolueno y los xilenos

Como se mencionó previamente, el precio del benceno, el tolueno y los xilenos en el mercado tiene una marcada dependencia del precio del crudo de petróleo, debido a que se produce principalmente a partir de este [5]. En la Tabla 4.40 se observan los precios de los productos, cuyos datos fueron obtenidos del *Independent Chemical Information Service* (ICIS) [40].

Producto	Precio (en dólares por tonelada métrica)
Benceno	1365 – 1400
Tolueno	~1100
Mezcla de isómeros de xileno	1130 – 1200

Tabla 4.40. Precios del benceno, el tolueno y la mezcla de isómeros de xileno (2014).
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de Independent Chemical Information Service [40].

Estos precios pueden ser tomados como base; sin embargo, pueden variar dependiendo del origen y destino del producto. Es importante resaltar que el precio podría cambiar si se obtienen estos compuestos a partir de metanol en lugar de petróleo como materia prima.

4.5. Principales fuentes y precios de metanol

En la página de *Methanol Institute* [41] se publicó un resumen de datos obtenidos por *Methanol Market Services Asia* (MMSA), una de sus asociaciones miembro, en el cual se muestra la evolución del precio del metanol en diferentes mercados durante los últimos tres años, el cual se muestra gráficamente en la Figura 4.20.

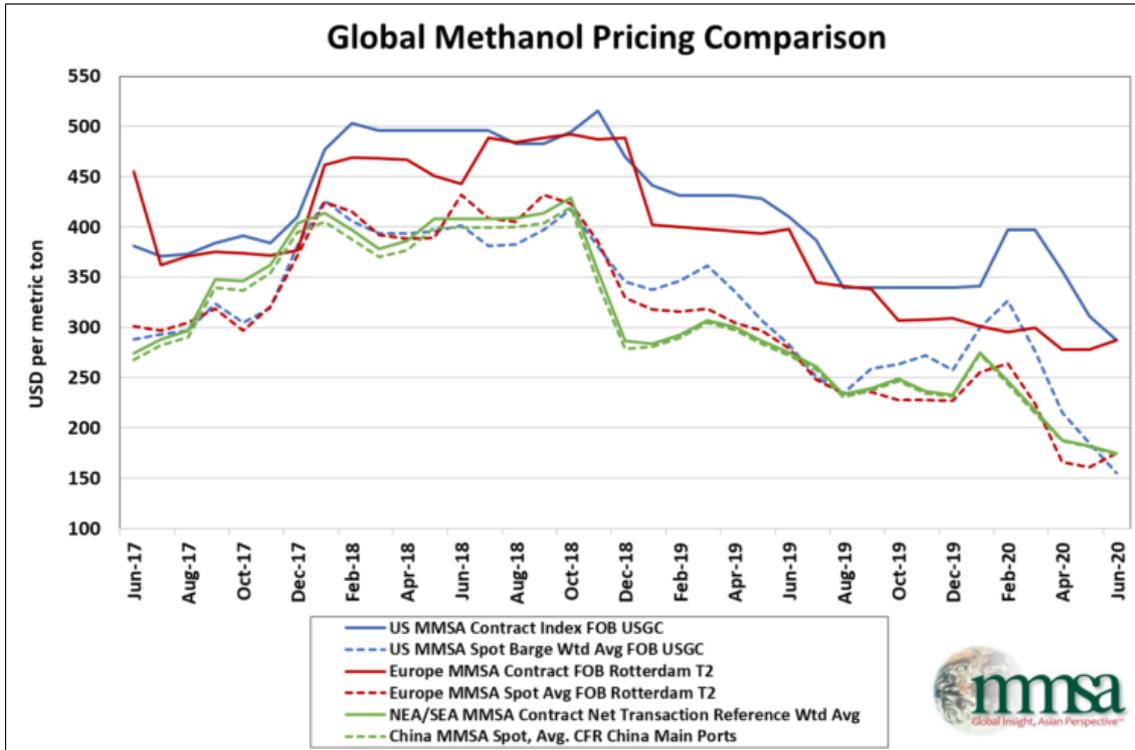


Figura 4.20. Evolución mensual del precio del metanol en mercados (2017-2020).
Fuente: Methanol Institute [41].

Se observa que los mercados de Asia poseen precios más accesibles; no obstante, también se deben tomar en cuenta los precios de Europa y Estados Unidos, que representan un porcentaje importante de la comercialización de metanol [37]. Considerando esto, el precio de la materia prima estaría entre los 175 dólares y los 290 dólares por tonelada métrica.

Según la información de OEC [37], la exportación de metanol se reparte entre todos los continentes del mundo, siendo Asia el lugar en donde se concentra el mayor valor de importaciones, seguido de Norteamérica, Europa, África, América del Sur y Oceanía respectivamente, teniendo al menos un país cuyas exportaciones representan una cantidad considerable en cada continente. El mayor exportador es Trinidad y Tobago, con 1.71 miles de millones de dólares, seguido por los asiáticos Arabia Saudí (1.53 miles de millones de dólares) e Irán (1.4 miles de millones de dólares). Varios otros países de Asia, como Malasia, Omán, Catar, Brunéi y otros más, también tienen un valor considerable en sus exportaciones. En América del Norte, Estados Unidos y Canadá son otros exportadores importantes, mientras que países como Países Bajos, Rusia, Noruega, la unión económica Bélgica-Luxemburgo, Alemania y Polonia cumplen el mismo rol en Europa. Egipto y Guinea Ecuatorial son los principales exportadores de metanol en

África, mientras que Venezuela, Chile y Argentina lo hacen en Sudamérica. En Oceanía, Nueva Zelanda exportó 553 millones de dólares en metanol.

CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica de las tecnologías existentes para la producción de benceno, tolueno y xilenos (BTX) a partir de metanol muestra avances alentadores en el camino a la potencial implementación de este proceso en reemplazo de la tradicional obtención como subproducto de la refinación del petróleo, dando lugar a la posibilidad de eliminar la dependencia entre estos productos. Las conclusiones de este trabajo de investigación son las siguientes:

1. De la información analizada, se concluye que es técnicamente viable el desarrollo de procesos de producción de BTX a partir de metanol mediante el uso de catalizadores de zeolita ZSM-5.

2. Sin embargo, y pese a existir estudios cuyos resultados muestran una reducción de costos de inversión para este tipo de procesos, las investigaciones que se han realizado desde que se patentaron las zeolitas ZSM-5 en 1972 hasta las de los últimos años muestran que todavía se requiere generar conocimientos más profundos con relación a la química de la reacción MTA, dado que las rutas reactivas aún no están lo suficientemente esclarecidas, y esto conlleva a que los modelos cinéticos relacionados, necesarios para el correcto diseño de reactores MTA a ser utilizados en este proceso, no tengan la precisión suficiente para predecir el comportamiento de la reacción química.

3. Asimismo, las pruebas con nuevos tratamientos y diferentes metales impregnados a las zeolitas ZSM-5 que se han realizado en los últimos años de manera continua demuestran que es posible seguir incrementando la selectividad hacia los aromáticos, pero que debe verse complementado con un amplio entendimiento de los parámetros de los catalizadores, condiciones de operación, y las rutas reactivas que se siguen para la transformación de la materia prima en productos finales.

4. Por otra parte, el análisis preliminar del mercado muestra la importancia del benceno, el tolueno y los xilenos en la industria mundial, no solamente por la cantidad de aplicaciones que cada uno tiene, sobre todo como materias primas o intermediarios para la síntesis de otros productos de valor, sino también por el valor de la comercialización internacional en exportaciones e importaciones que tienen los productos.

5. Se confirma que el benceno, el tolueno y los xilenos son dependientes de la disponibilidad y precio del petróleo a nivel mundial, y se evidencia al observar la similitud gráfica de la evolución de la comercialización internacional de los productos.

6. Está claro que el *p*-xileno es el producto cuyo mercado es el más amplio entre los mencionados, lo cual es coherente con que algunos estudios en los catalizadores para la reacción MTA buscaran no solamente una buena selectividad hacia los aromáticos en general, sino específicamente hacia el *p*-xileno, incluso por sobre el benceno y el tolueno, que también tienen mercados importantes.

7. Es resaltante el predominio de países de Asia en la comercialización internacional de todos los productos, con más presencia en algunos que en otros, pero acaparando la gran mayoría de exportaciones e importaciones. Europa y Estados Unidos son los principales lugares fuera de Asia que también cumplen papeles protagónicos en las transacciones, y podrían ser tomados en cuenta como mercados objetivo para potenciales procesos futuros de obtención de BTX, buscando competir con los productos que se obtienen a partir de petróleo.

8. Es necesario tomar en cuenta la tendencia identificada en el análisis preliminar, que muestra que la comercialización se da mayormente entre países de un mismo continente o zona geográfica, sobre todo en el caso de Asia, Europa y Norteamérica. En Sudamérica, África y Oceanía, las transacciones se dan mayormente entre continentes diferentes, puesto que, al ser zonas del mundo con mayores importaciones que exportaciones, requieren adquirir los productos de los tres continentes mencionados anteriormente, que tienen predominio en el mercado. Si un país de alguno de estos continentes tuviera mayores exportaciones de cualquiera de los productos, dada la tendencia observada en la mayoría de los casos, muy probablemente cambiaría el panorama actual y la comercialización pasaría a darse dentro del mismo continente, al igual que en los tres principales, ya que la cercanía geográfica es un factor importante. En

Sudamérica, por ejemplo, Brasil cumple ese rol en el caso del benceno, pero incluso así, algunos países de Sudamérica lo importan desde otros continentes.

La conclusión general es que el benceno, el tolueno y los xilenos se pueden obtener a partir de metanol mediante tecnologías que permiten la potencial implementación de procesos técnicamente viables, para los cuales se requieren más investigaciones para optimizar sus resultados y evaluar su prefactibilidad económica, en función de una oportunidad de mercado amplio para competir con los mismos productos obtenidos a partir de petróleo, identificada a partir de una exploración preliminar de la demanda de BTX.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Folkins, "Benzene," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Wiley-VCH, 2012, pp. 237-268.
- [2] J. Fabri, U. Graeser and T. A. Simo, Toluene, Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [3] R. Tomás, J. Bordado and J. Gomes, "p-Xylene Oxidation to Terephthalic Acid: A Literature Review Oriented toward Process Optimization and Development," *Chemical Reviews*, pp. 7421-7469, 2013.
- [4] A. Niziolek, O. Onel and C. Floudas, "Production of Benzene, Toluene and Xylenes from Natural Gas via Methanol: Process Synthesis and Global Optimization," *AIChE Journal*, vol. 62, no. 5, pp. 1531-1556, 2016.
- [5] D. Manca, A. Fini and M. Oliosi, "Dynamic Conceptual Design under Market Uncertainty and Price Volatility," in *21st European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, Elsevier, 2011, pp. 336-340.
- [6] J. Fabri, U. Graeser and T. A. Simo, "Xylenes," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim, Wiley-VCH, 2012, pp. 643-663.

- [7] D. I. Collias, A. M. Harris, V. Nagpal, I. W. Cottrel and M. W. Schultheis, "Biobased Terephthalic Acid Technologies: A Literature Review," *Industrial Biotechnology*, vol. 10, no. 2, pp. 91-105, 2014.
- [8] E. Fiedler, G. Grossmann, D. B. Kersebohm, G. Weiss and C. Witte, *Methanol*, Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- [9] C. D. Chang and A. J. Silvestri, "The conversion of methanol and other O-compounds to hydrocarbons over zeolite catalysts," *Journal of Catalysis*, vol. 47, pp. 249-259, 1977.
- [10] N. Li, C. Meng and D. Liu, "Deactivation kinetics with activity coefficient of the methanol to aromatics process over modified ZSM-5," *Fuel*, vol. 233, pp. 283-290, 2018.
- [11] Mobil Oil Corporation, "Crystalline zeolite ZSM-5 and method of preparing the same". United States Patent US3702886A, 14 November 1972.
- [12] Y. Ono, K. Osako, G. -J. Kim and Y. Inoue, "Ag-ZSM-5 as a Catalyst for Aromatization of Alkanes, Alkenes, and Methanol," *Studies in Surface Science and Catalysis*, vol. 84, pp. 1773-1780, 1994.
- [13] H. Li, P. Dong, D. Ji, X. Zhao, C. Li, C. Cheng and G. Li, "Effect of the Post-Treatment of HZSM-5 on Catalytic Performance for Methanol to Aromatics," *ChemistrySelect*, vol. 5, pp. 3413-3419, 2020.
- [14] Y. Ni, A. Sun, X. Wu, J. Hu, T. Li and G. Li, "Aromatization of Methanol over La/Zn/HZSM-5 Catalysts," *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 439-445, 2011.
- [15] Y. Ni, W. Zhu and Z. Liu, "Formaldehyde intermediate participating in the conversion of methanol to aromatics over zinc modified H-ZSM-5," *Journal of Energy Chemistry*, vol. 54, pp. 174-178, 2021.
- [16] M. Conte, J. A. Lopez-Sanchez, Q. He, D. J. Morgan, Y. Ryabenkova, J. K. Bartley, A. F. Carley, S. H. Taylor, C. J. Kiely, K. Khalid and G. J. Hutchings, "Modified zeolite ZSM-5 for the methanol to aromatics reaction," *Catalysis Science & Technology*, vol. 2, pp. 105-112, 2012.

- [17] G. Q. Zhang, T. Bai, T. F. Chen, W. T. Fan and X. Zhang, "Conversion of Methanol to Light Aromatics on Zn-Modified Nano-HZSM 5 Zeolite Catalysts," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, pp. 14932-14940, 2014.
- [18] Y. Inoue, K. Nakashiro and Y. Ono, "Selective conversion of methanol into aromatic hydrocarbons over silver-exchanged ZSM-5 zeolites," *Microporous Materials*, vol. 4, pp. 379-383, 1995.
- [19] X. Niu, K. Wang, Y. Bai, Y.-e. Du, Y. Chen, M. Dong and W. Fan, "Selective Formation of Para-Xylene by Methanol Aromatization over Phosphorous Modified ZSM-5 Zeolites," *Catalysts*, vol. 10, no. 484, 2020.
- [20] X. Zhu, J. Zhang, M. Cheng, G. Wang, M. Yu and C. Li, "Methanol Aromatization over Mg-P-Modified [Zn,Al]ZSM-5 Zeolites for Efficient Coproduction of para-Xylene and Light Olefins," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019.
- [21] B. Ghanbari, F. K. Zangeneh, Z. T. Rizzi and E. Aghaei, "High-Impact Promotional Effect of Mo Impregnation on Aluminum-Rich and Alkali-Treated Hierarchical Zeolite Catalysts on Methanol Aromatization," *ACS Omega*, 2020.
- [22] A. T. Aguayo, D. Mier, A. G. Gayubo, M. Gamero and J. Bilbao, "Kinetics of Methanol Transformation into Hydrocarbons on a HZSM-5 Zeolite Catalyst at High Temperature (400-550 °C)," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 49, pp. 12371-12378, 2010.
- [23] S. Ilias and A. Bhan, "Mechanism of the Catalytic Conversion of Methanol to Hydrocarbons," *ACS Catalysis*, vol. 3, pp. 18-31, 2013.
- [24] Y. Ni, W. Zhu and Z. Liu, "H-ZSM-5-Catalyzed Hydroacylation Involved in the Coupling of Methanol and Formaldehyde to Aromatics," *ACS Catalysis*, vol. 9, pp. 11398-11403, 2019.
- [25] J. R. Wilkerson, "Process for the production of cumene, polyetherimides, and polycarbonates". United States Patent US20060020047A1, 26 January 2006.
- [26] Saudi Basic Industries Corporation, "Integrated process for converting methane to aromatics and other chemicals". United States Patent US20160251293A1, 01 September 2016.

- [27] P. Ghorbannezhad, M. D. Firouzabadi, A. Ghasemian, P. J. De Wild and H. J. Heeres, "Sugarcane bagasse ex-situ catalytic fast pyrolysis for the production of Benzene, Toluene and Xylenes (BTX)," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018.
- [28] H. Wan and P. Chitta, "Catalytic Conversion of Propane to BTX over Ga, Zn, Mo, and Re Impregnated ZSM-5 Catalysts," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2016.
- [29] ExxonMobil Chemical Patents Inc, "Production of aromatics from methane". United States Patent US7589246B2, 15 September 2009.
- [30] T. R. Carlson, Y.-T. Cheng, J. Jae and G. W. Huber, "Production of green aromatics and olefins by catalytic fast pyrolysis of wood sawdust," *Energy & Environmental Science*, vol. 4, no. 145, 2011.
- [31] Y. Zheng, F. Wang, X. Yang, Y. Huang, C. Liu, Z. Zheng and J. Gu, "Study on Aromatics Production via the Catalytic Pyrolysis Vapor Upgrading of Biomass Using Metal-loaded Modified H-ZSM-5," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017.
- [32] G. Dai, S. Wang, Q. Zou and S. Huang, "Improvement of aromatics production from catalytic pyrolysis of cellulose over metal-modified hierarchical HZSM-5," *Fuel Processing Technology*, vol. 179, pp. 319-323, 2018.
- [33] C. Wang, Z. Si, X. Wu, W. Lv, K. Bi, X. Zhang, L. Chen, Y. Xu, Q. Zhang and L. Ma, "Mechanism study of aromatics production from furans with methanol over zeolite catalysts," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 139, pp. 87-95, 2019.
- [34] E. A. Uslamin, N. Kosinov, G. A. Filonenko, B. Mezari, E. Pidko and E. J. M. Hensen, "Co-Aromatization of Furan and Methanol over ZSM-5 - A Pathway to Bio-Aromatics," *ACS Catalysis*, vol. 9, pp. 8547-8554, 2019.
- [35] D. Zhang, M. Yang and X. Feng, "Aromatics production from methanol and pentane: Conceptual process design, comparative energy and techno-economic analysis," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 126, pp. 178-188, 2019.

- [36] W. Song, Y. Hou, Z. Chen, D. Cai and W. Qian, "Process Simulation of the Syngas-to-Aromatics Processes: Technical Economics Aspects," *Chemical Engineering Science*, 2019.
- [37] "OEC: The Observatory of Economic Complexity," Datawheel, [Online]. Available: <https://atlas.media.mit.edu/en/>. [Accessed 14 August 2020].
- [38] A. J. G. Simoes and C. A. Hidalgo, "The Economic Complexity Observatory: An Analytical Tool for Understanding the Dynamics of Economic Development," in *Conference: Scalable Integration of Analytics and Visualization, Papers from the 2011 AAAI Workshop*, San Francisco, 2011.
- [39] R. Leblanc, "Recycling Polyethylene Terephthalate," The balance small business, 08 April 2020. [Online]. Available: <https://www.thebalancesmb.com/recycling-polyethylene-terephthalate-pet-2877869>. [Accessed 21 August 2020].
- [40] "Chemical Industry News & Chemical Market Intelligence | ICIS.com," ICIS Explore, [Online]. Available: <https://www.icis.com/explore/>. [Accessed 10 June 2019].
- [41] "Methanol price and supply/demand," Methanol Institute, 2019. [Online]. Available: <https://www.methanol.org/methanol-price-supply-demand/>. [Accessed 01 September 2019].

