



doi: 10.4321/s0465-546x2025000100004

Artículo original

# Curva de rotura para la eliminación de diisocianato 2,4-tolueno por adsorción mediante carbón activo en entornos laborales

Breakdown curve for the removal of 2,4-toluene diisocyanate by adsorption using activated carbon in occupational areas

Borja Garrido Arias<sup>1,2</sup>  0000-0002-7299-0184

<sup>1</sup>Universidad Europea de Madrid, Departamento Online Arquitectura y Diseño, Madrid, España. Máster universitario en Ingeniería Industrial, Madrid, España.

<sup>2</sup>Universidad Miguel Hernández. Facultad de Medicina. Máster universitario en Prevención de Riesgos laborales, Elche, Alicante.

---

## Correspondencia

Dr. Ingeniero Borja Garrido Arias  
[borja.garrido@universidadeuropea.es](mailto:borja.garrido@universidadeuropea.es)

---

**Recibido:** 09.01.2024

**Aceptado:** 28.03.2025

**Publicado:** 31.03.2025

---

## Contribuciones de autoría

Todos los autores contribuyeron de manera igualitaria en la realización de esta investigación y la escritura del artículo.

---

## Financiación

Ninguna.

---

## Conflicto de intereses

Se señala la no existencia de conflicto de intereses para los autores del presente artículo.

---

## Cómo citar este trabajo

Garrido Arias B. Curva de rotura para la eliminación de diisocianato 2,4-tolueno por adsorción mediante carbón activo en entornos laborales. *Med Segur Trab (Internet)*. 2025;71(278):45-55. doi: 10.4321/s0465-546x2025000100004

---

 BY-NC-SA 4.0

## Resumen

**Introducción:** el uso de diisocianatos de distintas formulaciones está suponiendo un desafío a nivel de prevención de riesgos laborales por las nuevas Directivas europeas. De forma general, las mismas obligan a una reducción de los valores límites ambientales de exposición laboral, así como a una formación específica por parte de los trabajadores que los manipulan. El diisocianato de 2,4-tolueno (TDI) posee un amplio uso en distintos sectores industriales, principalmente la producción de poliuretanos, así como la producción de material sanitario o textil.

**Método:** el proceso de eliminación por adsorción del TDI se ha realizado en una campana de trabajo de tiro forzado simulada a escala de laboratorio con varios tipos lechos de carbón activo que tratan la corriente extraída. Se ha determinado las concentraciones de entrada y salida para la obtención de la curva de rotura y sus variables para el posterior escalado industrial. La medición se ha realizado mediante tubos colorimétricos con gran reproducibilidad a escala industrial.

**Resultados:** La obtención de las curvas de rotura y sus variables (tiempos de rotura y saturación, longitud de la zona de transferencia de materia y velocidad lineal del flujo) permiten el diseño para su escalado industrial e instalación real como punto de partida. La eliminación del TDI es viable con carbones activos accesibles industrialmente.

**Conclusiones:** de forma general se ha determinado que los tiempos de trabajo permiten operar con el mismo lecho durante la jornada laboral sin paradas, adecuando las corrientes de ventilación a las legislaciones medioambientales de emisiones de diisocianatos.

---

**Palabras clave:** diisocianato; carbón activo; toxicología laboral.

## Abstract

**Introduction:** The use of diisocyanates in different formulations is posing a challenge in terms of occupational risk prevention due to the new European Directives. In general, these directives require a reduction of the environmental limit values for occupational exposure as well as specific training for the workers who handle them. 2,4-toluene diisocyanate (TDI) is widely used in different industrial sectors, mainly in the production of polyurethanes as well as in the production of sanitary and textile materials.

**Method:** The adsorption removal process of TDI has been carried out in a laboratory-scale simulated forced draught working hood with various types of activated carbon beds treating the extracted stream. The inlet and outlet concentrations were determined to obtain the breakthrough curve and its variables for subsequent industrial scale-up. The measurement was carried out using colourimetric tubes with high reproducibility on an industrial scale.

**Results:** Obtaining the breakthrough curves and their variables (breakthrough and saturation times, length of the matter transfer zone and linear flow velocity) allows design for industrial scale-up and actual installation as a starting point. The elimination of TDI is feasible with industrially accessible activated carbons.

**Conclusions:** In general, it has been determined that the working times allow operating with the same fixed bed during the working day without stops, adapting the ventilation flows to the environmental legislation on diisocyanate emissions.

---

**Keywords:** diisocyanate; activated carbon; occupational toxicology.

## Introducción

El uso de isocianatos se encuentra muy extendido en el ámbito industrial, desde la fabricación de espumas, recubrimientos, adhesivos y plásticos, hasta ser considerado un componente clave en la industria del poliuretano. A pesar de su amplia aplicación, los isocianatos representan un riesgo significativo para la salud humana en general y de los trabajadores en particular. La exposición prolongada puede causar irritación en los ojos, la piel y las vías respiratorias, además de ser un potencial sensibilizante que puede generar reacciones alérgicas <sup>(1)</sup>. En casos graves, la exposición excesiva a estos compuestos puede provocar asma ocupacional y otras afecciones respiratorias cronicadas <sup>(2)</sup>. Por esta razón, se deben implementar medidas de seguridad en los entornos laborales donde se manipulan isocianatos, como el uso de equipos de protección personal y sistemas de ventilación adecuados <sup>(3)</sup>. En este contexto las instituciones y organismos de gobierno han definido e implantado normativas para controlar los niveles de exposición en el ambiente de trabajo. En el pasado 2020, la legislación europea ha dictaminado una directiva relacionada con su uso, control de exposición, así como formación e información ante su manipulación en entornos laborales. El Reglamento (UE) 2020/1149 de la Comisión de 3 de agosto de 2020 que modifica, por lo que respecta a los diisocianatos, el anexo XVII del Reglamento (CE) 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y mezclas químicas (REACH) <sup>(4)</sup> plantea nuevos límites en cuanto a la exposición laboral de exposición diaria y corta así como la necesidad de formación específica en cuanto a la manipulación de compuesto (anexo I directiva 98/24/CE). En cuanto a los distintos tipos de formaciones se detalla personal con aplicación directa en cabina mediante brocha, pulverización... los nuevos límites de exposición a diisocianatos también cobran gran relevancia (sin especificar su fórmula química molecular) los cuales se ven reducidos a 6 µg NCO/m<sup>3</sup> como valor límite ambiental de exposición diaria (en adelante VLA-ED) y 12 µg NCO/m<sup>3</sup> como valor límite ambiental de exposición corta (en adelante VLA-EC) siendo el valor permitido de 20 µg NCO/m<sup>3</sup> hasta 2028 para este último.

Uno de los diisocianatos cuyo uso se encuentra regulado por valor de exposición a agentes químicos (Listado Límite de Exposición Profesional en España) es el diisocianato de 2,4- tolueno (en adelante TDI). Su valor de referencia de exposición en la legislación española viene determinado por los siguientes valores de referencia (Tabla 1) <sup>(5)</sup>:

**Tabla 1.** Límites de exposición del diisocianato de 2,4-tolueno, año 2024, INSST, España

Año/Componente	VLA-ED (mg/L)	VLA-EC (mg/L)
2024 (diisocianato de 2,4- tolueno)	0,005	0,02

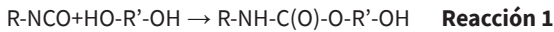
Los valores de referencia anteriores muestran ya unas cifras con cumplimiento según lo establecido en la anterior mencionada directiva europea.

El TDI es uno de los compuestos más importantes en la industria química de generación de polímeros, especialmente en la producción de poliuretanos. En el campo de los poliuretanos sus aplicaciones son múltiples, tanto para la producción de poliuretanos rígidos como flexibles. En la industria automotriz cobra gran importancia como sellador y aislante, así como elastómeros en componentes de máquinas industriales que requieren gran resistencia tanto mecánica como química <sup>(6)</sup>.

La industria del calzado es otra con importante peso, donde, los materiales, en especial las suelas del calzado <sup>(7)</sup> requieren de gran resistencia. Incluso su uso está extendido en el ámbito médico/quirúrgico donde se requieren materiales compatibles con los tratamientos médicos a ejecutar <sup>(8)</sup>. Con todo ello queda demostrado el amplio campo de empleo de este compuesto que, combinado con otros reactivos como son los polioles generan los poliuretanos.

Por todo lo expuesto anteriormente la exposición a los diisocianatos cobra una importancia relevante dado que, en muchas ocasiones, la reacción entre el polirol y el diisocianato (Reacción 1 de adición nu-

cleófila) no es completamente cuantitativa <sup>(9)</sup> quedando parte del mismo sin reaccionar en el entorno laboral con el riesgo laboral que ellos implica en cuanto a exposición laboral se refiere:



Por otro lado, acorde a la legislación actual en España (Ley 31/1995) <sup>(10)</sup>, se debe contemplar que es de obligado cumplimiento minimizar el riesgo en origen como filosofía general para los prevencionistas. Considerando la especialidad de Higiene Industrial (R.D.39/1997) <sup>(11)</sup> una de las técnicas para reducir el riesgo a la exposición a agentes químicos es la ventilación por dilución, así como el confinamiento de los correspondientes entornos de trabajo donde el riesgo de exposición a agentes químicos de relevante categoría de toxicidad pondera a nivel profesional. *La NTP 741: Ventilación general por dilución* <sup>(12)</sup> es un ejemplo de documento de referencia para implementar dicha medida preventiva. La misma aporta el diseño de caudales de aire necesarios para ventilar espacios de trabajo, bien uni o multi-componente, contemplando VLA para los distintos agentes químicos. La emisión de contaminantes al exterior implica un riesgo para el medio ambiente, la sociedad y la Salud Pública en general, más aún tras liberar el agente a un espacio abierto procedente de un entorno de trabajo. El empleo de técnicas de trabajo bajo confinamiento del recinto hace que se reduzca la exposición a agentes químicos (Real Decreto 374/2001) <sup>(13)</sup> en el entorno laboral, pero se emite al medioambiente comenzando una nueva cadena de exposición y diseminación del agente tóxico. Contemplando la evaluación ambiental es importante considerar el riesgo y control legislativo existente en cuanto a emisiones gaseosas en los países miembros europeos donde, cada día, los controles y regulaciones son más restrictivos. En Europa, por ejemplo, destaca la Directiva 2010/75/UE sobre las emisiones industriales (IED) <sup>(14)</sup>, la cual establece las normas para la prevención y el control de las emisiones contaminantes derivadas de la actividad industrial. En el caso de España, destaca el Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación <sup>(15)</sup>. En dicho texto consolidado se hace referencia a la necesidad de control y regulación de las emisiones contaminantes varias, destacando entre ellos las emisiones de diisocianatos al medio ambiente (Anejo 1, punto 4, Industrias Químicas del texto consolidado 2).

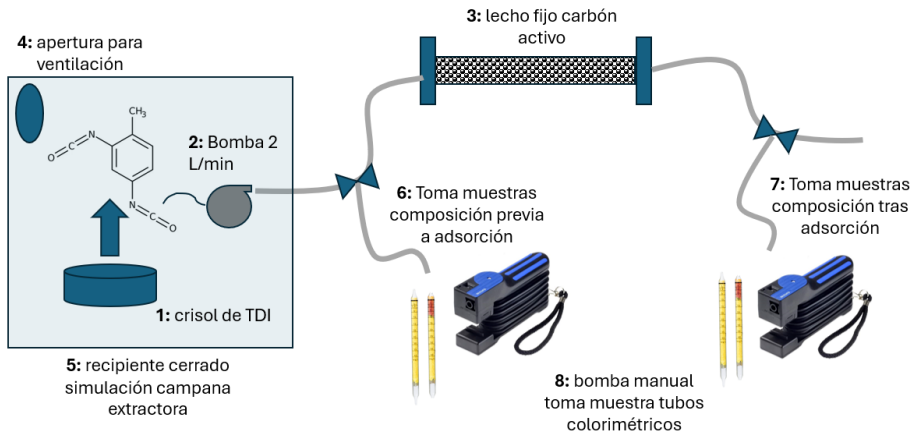
La presente investigación ha tenido como objetivo principal diseñar un sistema de retención de diisocianato de 2,4-tolueno en una industria mediante un lecho de carbón activo con el objetivo de eliminarlo del entorno de trabajo reduciendo su posterior emisión al medio ambiente. Se justifica el estudio ante la ausencia en bibliografía de métodos de retención del TDI en cuestión bajo circunstancias productivas análogas. Gracias al presente estudio muchas industrias pueden tomar como referencia un sistema de retención del contaminante cuya gestión posterior será mucho más sencilla, procediendo a la gestión del residuo como un residuo sólido o, por el contrario, dejando opción a futuros investigadores de técnicas de recuperación/desorción del contaminante confinado. Gracias al procedimiento de retención optimizado se reducirá la emisión de contaminantes al medio ambiente estableciendo lazos de unión y coherencia entre prevención de riesgos laborales, respeto por el medio ambiente y cumplimiento con distintas legislaciones multidisciplinarias, tanto medioambientales como preventivas en el ámbito laboral. Por último, el objetivo específico de preservación de la Salud Pública es uno de los logros más deseados con la presente.

## Materiales y métodos

La determinación del grado de adsorción del TDI se ha realizado mediante el esquema de laboratorio representado en la Figura 1.

Para la determinación del entorno laboral (cabina, sala de trabajo, área de almacenamiento...) y sus condiciones en cuanto a grado de exposición se ha diseñado la cámara de trabajo (campana de tiro forzado). Dicho habitáculo evalúa condiciones tanto por la presencia de TDI en forma de gaseosa como por la posible presencia de aerosoles, el TDI empleado fue de la marca comercial Sigma Aldrich. La concentración ambiental del TDI fue generada mediante el crisol sin tapa, con una elevada superficie que fomenta la evaporación y el aumento de concentración ambiental. La evaporación se vio reforza-

da por la bomba FLPG Plus a un caudal de 2L/min que derivaba el flujo circulante al lecho de carbón activo. La generación de este caudal circulante fomentó la renovación de aire en el habitáculo anterior fomentando la evaporación del TDI y propició el aumento de la transferencia de materia al entorno laboral simulado. El caudal de extracción circuló a través del lecho de carbón de longitud 15 cm y 3 cm de diámetro en vidrio templado.



**Figura 1.** Esquema del montaje experimental

Para determinar el grado de adsorción se trabajó con dos tipos de carbones comerciales cuyas propiedades se definen en la Tabla 2. Los métodos y propiedades definidas fueron extraídas de sus correspondientes fichas de seguridad. Ambos carbones activos fueron en base mineral bituminosa cuya activación se obtuvo térmicamente.

**Tabla 2.** Propiedades químico-físicas de los carbones empleados

Propiedad	Carbón 1	Carbón 2	Método de caracterización por el fabricante
Índice de yodo (mg/g)	980	950	ASTMD 4607
Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	1105	1050	BET adsorción de nitrógeno
Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	1,2	0,9	ASTMD 3802
Cenizas (%)	14	16	ASTMD 2866

El análisis químico cuantitativo, tanto de las condiciones de entrada como de salida del lecho para cada uno de los carbones, se determinó mediante tubos colorímetros de la marca Dräger. Con el objetivo de poder escalar el equipo y su reproducibilidad al ámbito real industrial se ha trabajado con la bomba manual para tubos de la marca Accuro (se realizan 5 emboladas manuales por cada medición tal y como se recomienda con los tubos colorimétricos y el fabricante). El uso de los tubos de medición directa redujo costes y facilita su reproducibilidad, también aportó una sencillez en las medidas de campo. La técnica implicó mayor incertidumbre, pero permitió realizar medidas *insitu* pudiendo tomar decisiones ante riesgos de exposición instantáneos. El uso de técnicas instrumentales analíticas como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) implicaba una posible pérdida en la calidad de la matriz a analizar y un coste asociado elevado, no siendo viable su implementación a escala real en industria (por ello se descartó en la presente investigación la instrucción de trabajo recomendada

por el INSST, no sólo por el tecnicismo del método, sino también por la antigüedad de su redacción, año 1995) <sup>(16)</sup>. De igual forma el uso del HPLC implicaba dilatación en los tiempos de obtención de resultados, contemplando la toma de muestras, el transporte y la emisión del informe correspondiente.

La determinación del avance de la adsorción en función del tiempo se realizó mediante mediciones directas del TDI en la entrada y salida de la columna de adsorción. Gracias a dichas mediciones se dedujo la denominada curva de rotura de adsorción. Con las variables de diseño deducidas de la misma se pudo obtener el escalado industrial considerando constantes la velocidad lineal del flujo de aire, la longitud de la zona de transferencia de materia y la longitud no usada del lecho en cuestión <sup>(17)</sup>. Se determinó la concentración en cada tiempo mediante la medición directa en tubo colorimétrico.

## Resultados

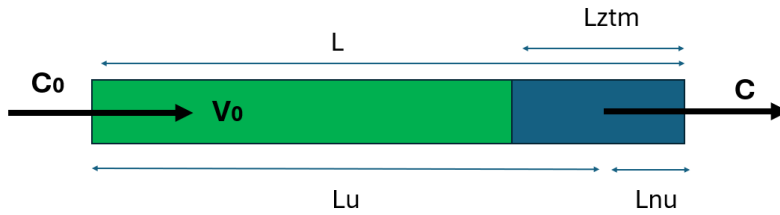
A continuación, en la Tabla 3 se muestra la relación entre la concentración de TDI a la salida del lecho a tiempo  $t$  y la concentración de entrada al sistema, todos los experimentos se realizaron a la temperatura de 23°C. Con el objetivo de armonizar criterios y tomar un valor de referencia se determinó un valor promedio de TDI en el intervalo de tiempo de estudio del avance de la adsorción, siendo éste de 0,18 mg/L a la entrada del sistema. En la Tabla 3 se muestran los valores del avance para los carbones 1 y 2 empleados en la investigación.

**Tabla 3.** Curva de rotura del lecho adsorbente experimental

C/C0 carbón 1	Tiempo (h) carbón 1	C/C0 carbón 2	Tiempo (h) carbón 2
0	0	0	0
0	1	0	0,7
0,03	1,5	0,05	2,5 (tiempo de rotura carbón 1)
0,06	2 (tiempo de rotura carbón 2)	0,08	2,8
0,10	2,5	0,15	3
0,20	3	0,25	3,8
0,45	3,5	0,42	4,5
0,60	4,0	0,65	5,0
0,80	6,0	0,79	6,8
0,93	7,5	0,94	7,5 (tiempo de saturación carbón 1)
0,96	8,3 (tiempo de saturación carbón 2)	0,97	8,1
1,00	8,5	1,00	8,6

Según la teoría de la adsorción se deduce que el sistema alcanza el tiempo de rotura y de saturación cuanto la ratio C/C0 alcanza el valor de 0,05 y 0,95 respectivamente. Atendiendo a la Tabla 3 se observan ambos valores para cada uno de los carbones subrayados. Gracias a dichos valores se puede

determinar las variables de diseño para su posterior escalado industrial. El flujo y variables de diseño en el lecho de adsorción fijo se define en la Figura 2 donde:



**Figura 2.** Variables de diseño contempladas en la adsorción

Donde:

- $L$ : longitud total del lecho (m)
- $L_{z_{tm}}$ : longitud de la zona de transferencia de materia (m)
- $L_{nu}$ : longitud de la zona no usada (m). El doble se corresponde con la  $L_{z_{tm}}$
- $L_u$ : longitud de la zona usada (m)

La fracción de lecho usada (FU) se calculó mediante el tiempo de rotura y la diferencia de tiempos entre el de saturación y el de rotura la fracción del lecho empleada en la adsorción del contaminante. Se deduce estableciendo el cociente entre la cantidad de adsorbato retenida entre la capacidad total de adsorción. En la ecuación 1 se demuestra el procedimiento de cálculo de la fracción usada obtenida en cada uno de los carbones estudiados <sup>(18)</sup>.

$$FU = \frac{\text{Adsorbato adsorbido}}{\text{Capacidad de adsorción total}} = \frac{Q \cdot C_0 \cdot t_R}{Q \cdot C_0 \cdot t_S - Q \cdot \int_{t_R}^{t_S} C \cdot dt} = \frac{t_R}{t_R + \frac{t_S - t_R}{2}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$Q$ : caudal volumétrico circulante ( $m^3/h$ )

$C_0$ : Concentración inicial de entrada del TDI ( $mg/L$ )

$t_R$ : tiempo de rotura (h)

$t_S$ : tiempo de saturación (h)

La determinación de la FU permitió determinar las correspondientes longitudes de lecho usadas y no usadas según la Ecuación 2 y 3:

$$L_U = FU \cdot L \quad \text{Ecuación 2}$$

$$L_{NU} = (1 - FU) \cdot L \quad \text{Ecuación 3}$$

Con el volumen de la columna de laboratorio y la densidad de cada uno de los carbones se determinó la masa de carbón introducida en cada uno de los experimentos según la Ecuación 4 y 5:

$$1,06 \cdot 10^{-4} m^3 \cdot \frac{0,9 Kg}{m^3} = 0,095 Kg \quad \text{Ecuación 4}$$

$$1,06 \cdot 10^{-4} m^3 \cdot \frac{1,2 Kg}{m^3} = 0,127Kg \quad \text{Ecuación 5}$$

Con dichas cantidades y la FU determinadas se dedujo la capacidad de adsorción real de cada uno de los lechos estudiados según la Ecuación 6:

$$W_U = W \cdot FU \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- $W_U$ : masa usada de lecho (Kg)
- $W$ : masa total del lecho (Kg)
- $FU$ : Fracción usada

La velocidad lineal suponiendo flujo pistón se determina según la Ecuación 7:

$$V_0 = \frac{Q}{S} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- $V_0$ : velocidad lineal del flujo (m/s)
- $Q$ : caudal volumétrico del flujo (m<sup>3</sup>/s)
- $S$ : sección del lecho (m<sup>2</sup>)

Por último, se determinó la longitud de la zona de transferencia de materia y la longitud de la zona no usada (Ecuación 8), variables que se mantendrán constantes en el cambio de escala al lecho industrial:

$$L_{ZTM} = 2 \cdot L_{NU} \quad \text{Ecuación 8}$$

En la Tabla 4 se muestra el resumen de los resultados y variables calculadas para cada uno de los tipos de carbones:

**Tabla 4.** Resultados del estudio de adsorción tras análisis de la curva de rotura

	<b>Carbón 1</b>	<b>Carbón 2</b>
Q (L/min)	2	2
Co (mg/L)	0,18	0,18
tR (h)	2,5	2,0
ts (h)	7,5	8,3
FU (%)	47,1	40,0
Lnu (cm)	7,94	9,00
Lztm (cm)	15,88	18,00
Lu (cm)	7,07	6
Wu (Kg)	0,044	0,051
V0 (m/s)	2,83	2,83

## Discusión

Atendiendo a los tiempos de rotura y las fracciones usadas se observó como el carbón con mayor superficie de adsorción aporta una mayor capacidad de retención del contaminante. Otra ventaja asociada es el valor del tiempo de rotura el cual es mayor para el carbón con mayor superficie de igual forma. En caso de querer implementar una máxima eliminación de emisiones atmosféricas el grado de aprovechamiento será mayor acorde a las variables analizadas en este tipo de carbón. En cuanto a los tiempos de saturación, se deberá determinar en función de los límites de concentración de emisiones permitidos en cada caso concreto para determinar el valor máximo de aprovechamiento del lecho a

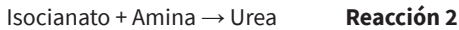


un tiempo determinado acorde a los tiempos de rotura y saturación decisivos para el diseño y cambio a escalado industrial.

Es importante de igual forma contemplar como factor determinante de la eficacia de retención la presencia de grupos funcionales reactivos con el TDI. Para evidenciar esta fenomenología se ha realizado un análisis químico cualitativo mediante Espectroscopía Infrarroja transformada de Fourier (FTIR) por estar suficientemente documentada la longitud de onda del pico de las mismas. Entre 1000 y 1350  $\text{cm}^{-1}$  <sup>(19)</sup> se presenta banda de tensión y/o estiramiento del enlace carbono-nitrógeno típico del enlace amina. En ambos carbones se ha realizado el espectro observando una fuerte señal en el carbón tipo 1, independientemente del tipo de amina (primaria o secundaria) presente en la química de superficie del carbón. Se deduce la posible mayor eficacia de la retención consecuencia de su posible eliminación catalítica producida por la superficie del mismo.

En la experimentación se sospecha de igual forma la posible aparición de la Reacción 2 donde se muestra una reacción genérica de adición nucleófila entre las aminas y los diisocianatos produciendo las carbamidas (ureas) <sup>(20)</sup>. Cuando un isocianato reacciona con una amina, se forma una urea, que es un compuesto en el que el átomo de carbono del isocianato está unido a un grupo amino (-NH<sub>2</sub>) a través de un enlace amida. Este fenómeno puede implicar de igual forma la quimisorción de dicho diisocianato con los grupos amino de la superficie catalítica de los carbones activos empleados.

La reacción general se describe como sigue:



La reacción implica el carácter nucleófilo del grupo amino (-NH<sub>2</sub>) de la amina, su mecanismo queda definido por el ataque al carbono del grupo isocianato (-N=C=O), rompiendo el doble enlace entre el nitrógeno y el carbono, lo que da lugar a la formación de un enlace simple entre el nitrógeno de la amina y el carbono que antes estaba unido al oxígeno en el isocianato. Se elimina dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en algunos casos, o el producto final es una urea dependiendo de las condiciones. Si bien es cierto que este aspecto no ha sido comprobado mediante el análisis de superficie del carbón en cuanto a la presencia de grupos amino es posible que el carbón activo disponga de los mismos en su superficie. Estos grupos amino pueden formarse durante el proceso de modificación química del carbón activo, por ejemplo, mediante un tratamiento con aminas o ácidos, lo cual aumenta la afinidad del material por ciertos contaminantes o moléculas <sup>(21)</sup>. No ha sido el caso para la presente investigación dado que los tratamientos realizados han sido térmicos para ambos carbones, no obstante, no se descarta la posible aparición de los grupos amino consecuencia de dichos tratamientos atendiendo a la matriz orgánica origen de creación de dichos carbones.

## Conclusiones

Se concluye con el presente estudio un procedimiento de eliminación de diisocianato de 2,4-tolueno mediante adsorción de carbón activo. Empleando los dos tipos de carbones estudiados con activación térmica aportan excelentes resultados de adsorción, siendo mayor aquel que aporta una mayor superficie de contacto. El estudio del espectro infrarrojo de Transformada de Fourier indica la existencia de grupos amino en alta concentración, los cuales son susceptibles de reaccionar con el diisocianato de 2,4-tolueno para la formación de carbamidas. Se concluye en este sentido que la fenomenología de eliminación se produce por adsorción física como por reacción catalizada por el lecho y sus grupos amino. Gracias a las curvas de ruptura y las variables a escala de laboratorio se puede emplear la presente investigación para su escalado industrial considerando que se mantienen constantes la diferencia entre el tiempo de saturación y de rotura, la velocidad lineal del flujo, así como la longitud no usada. Por otro lado, se considera que, de cara a la fracción usada el lecho industrial a diseñar aportará un mejor resultado de la variable dado que, por lo general, los tiempos de rotura son mayores en el cambio de escala. Este aspecto es una ventaja importante en materia de prevención de riesgos laborales dado que aportará tiempos superiores a las 8 h de jornada laboral, permitiendo al sistema operar en continuo sin interrumpir las jornadas y actividades laborales de producción.

El trabajo aporta una conexión entre distintos tipos de legislaciones (medioambientales, laborales...) permitiendo contribuir a las recientes normativas y directivas europeas. De cara a futuras investiga-

ciones se plantea realizar su estudio a escala industrial manteniendo el mismo procedimiento experimental de análisis de concentraciones, así como la opción de empleo de otros carbones con otros tratamientos de activación.

## Bibliografía

1. Uscategui Y. Poliuretanos sintetizados a partir de aceite de higuera y diisocianatos candidatos en aplicaciones biomédicas como materiales para suturas no absorbibles [tesis doctoral]. Chía (Colombia): Universidad de La Sabana; 2019.
2. Saavedra R, González C, Pérez J, et al. Diisocianatos en el ámbito laboral (I): Conceptos generales. Efectos sobre la salud. 2024.
3. de la Fuente AES, Alba L, Brown A, Fernández M, Bordado JM, de la Hoz Y, et al. Bronchial provocation tests its diagnostic utility and in the recognition of bronchial asthma by toluene diisocyanate/Pruebas de provocación bronquial su utilidad diagnóstica y en la dictaminación de asma bronquial por diisocianato de tolueno. *Red de Investigación en Salud en el Trabajo*. 2024;3(5):11-15.
4. Comisión Europea. Reglamento (UE) 2020/1149 de la Comisión de 3 de agosto de 2020 que modifica, por lo que respecta a los diisocianatos, el anexo XVII del Reglamento (CE) 1907/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo al registro, la evaluación, la autorización y la restricción de las sustancias y mezclas químicas (REACH). Diario Oficial de la Unión Europea; 2020.
5. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Límites de exposición profesional para agentes químicos 2024. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo; 2024.
6. Domínguez J, Pérez S, García E, et al. Asma inducido por isocianatos. *Arch Bronconeumol*. 1988;24(6):245-249.
7. Bagni Sánchez M, Pérez R, González E, et al. Caracterización de poliuretanos obtenidos a partir de polioles “verdes”. En: V Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas; 2018; San Rafael, Argentina. p. 172.
8. Gregori BS, Alba L, Brown A, Fernández M, Bordado JM, de la Hoz Y, et al. Los poliuretanos biodegradables. Estudio bibliográfico de su síntesis y aplicaciones. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. 2007;41(2):3-9.
9. Cruz MDC, Roblero YR, Gordillo RM, Hidalgo MCL, González JHC. Evaluación de la relación molar poliol/diisocianato en las propiedades fisicoquímicas de biopoliuretano producido a partir de grasa avícola. *Espacio I+D, Innovación más desarrollo*. 2024;13(35).
10. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. Boletín Oficial del Estado; 1995.
11. Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención. Boletín Oficial del Estado; 1997.
12. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. NTP 741: Ventilación general por dilución. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo; [fecha de acceso: 28 marzo 2025].
13. Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo. Boletín Oficial del Estado; 2001.
14. Directiva 2010/75/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 24 de noviembre de 2010 sobre las emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación). Diario Oficial de la Unión Europea; 2010.
15. Real Decreto 815/2013, de 18 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. Boletín Oficial del Estado; 2013.

- 16.** Determinación de isocianatos orgánicos 2,6 y 2,4-toluen-diisocianato, hexametilendiisocianato, 4,4'-difenilmetano-diisocianato) en aire. Método de derivación y doble detección ultravioleta y electroquímica. Cromatografía líquida de alta resolución; [fecha de acceso: 28 marzo 2025].
- 17.** Calleja G, et al. Introducción a la ingeniería química. Síntesis. 2008.
- 18.** Contreras J, et al. Capacidad de adsorción del carbón activado de algarrobo como lecho fijo para la adsorción de níquel. *Rev Técnica Fac Ingen Univ Zulia*. 2016;39(1):24-30. Disponible en: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0254-07702016000100005&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702016000100005&lng=es&tlng=es) [Accedido: 28 marzo 2025].
- 19.** Poole CPJ, Owens FJ. Introducción a la nanotecnología. España: Reverte; 2023.
- 20.** Hardegger E. Introducción a las prácticas de química orgánica. España: Reverte; 2022.
- 21.** Chia LL, Ng DH. Modification of activated carbon by amination for the removal of methylene blue from aqueous solution. *J Environ Chem Eng*. 2016;4(3):3142-3149. doi: 10.1016/j.jece.2016.07.023.